INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | ESPINTRÓNICA Y CEREBRO | LA CRISIS DE AGROBIODIVERSIDAD | MÁS ALLÁ DEL ÚLTIMO TEOREMA DE FERMAT | N.º 532 | ENERO 2021

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Enero 2021 • N.º 532 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

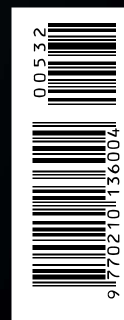
LA ESPINTRÓNICA IMITA AL CEREBRO

Un nuevo enfoque inspirado en la arquitectura cerebral permitiría diseñar ordenadores más eficientes

AGRICULTURA
Crisis de biodiversidad en los cultivos

MATEMÁTICAS
Mas allá del último teorema de Fermat

COVID-19
Vacunación en tiempos de incertidumbre





INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Enero 2021, Número 532

ARTÍCULOS

ELECTRÓNICA
22 La espintrónica imita al cerebro
En términos energéticos, el cerebro es mucho más eficiente que los ordenadores. ¿Cabe inspirarse en él para fabricar mejores dispositivos? *Por Julie Grollier y Damien Querlioz*

EVOLUCIÓN
32 La diversificación de las aves
La diversidad de las aves modernas raya lo increíble. Un nuevo estudio matiza cómo alcanzaron supuestamente ese gran éxito evolutivo. *Por Kate Wong*

NEUROCIENCIA
38 El trastorno de histeria en el siglo XXI
Comienzan a esclarecerse las causas de esta misteriosa enfermedad, hoy llamada trastorno neurológico funcional, que desdibuja la frontera entre la psiquiatría y la neurología. *Por Diana Kwon*

MATEMÁTICAS
46 Más allá del último teorema de Fermat
Los matemáticos han averiguado cómo extender la correspondencia de Langlands, un misterioso puente que conecta dos continentes lejanos del mundo matemático. *Por Erica Klarreich*

AGRICULTURA: LA CRISIS DE LA BIODIVERSIDAD
56 La conservación de la biodiversidad cultivada
En la actual era de globalización agroalimentaria, ¿qué papel deben desempeñar las variedades agrícolas tradicionales? ¿Qué estrategias permiten mantener y fomentar la biodiversidad de los cultivos mediterráneos? *Por Francesc Casañas, Joan Simó y Joan Casals*

64 Al rescate del arroz
Algunas variedades olvidadas de este cereal básico soportan bien las inundaciones, las sequías y otras adversidades. Pero recuperarlas constituye una empresa difícil. *Por Debal Deb*

SOCIOLOGÍA
72 La pandemia que olvidamos
La gripe de 1918 acabó con la vida de millones de personas, pero luego desapareció de la memoria colectiva. ¿Ocurrirá lo mismo con la COVID-19? *Por Scott Hershberger*

CIENCIA EN IMÁGENES
76 Microinstantáneas luminosas
Las micrografías ópticas obtenidas por científicos y aficionados revelan detalles asombrosos de la naturaleza. *Por Andrea Gawrylewski*

DANIEL CASTRANOVA, BRANT WEINSTEIN Y BAKARY SAMASA, INSTITUTOS NACIONALES DE SALUD DE EE.UU.


4


21


52

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
Los canales de El Niño. Vermes en la sangre. El volumen de las secuoyas. Moléculas fotoexcitadas. Pistas sobre la regresión de las abejas Erupciones explosivas. ADN antiguo conservado en el suelo. El auge de las explosiones rápidas de radio. Huellas de rinoceronte. La ionosfera sobre África. La historia del plomo.

14 Panorama
Cinco siglos de inundaciones en Europa.
Por Francis Ludlow y Rhonda McGovern

16 Inundaciones en la región mediterránea española
Por Mariano Barriendos

El mayor mapa tridimensional del universo
Por Andreu Font-Ribera, Héctor Gil-Marín, Santiago Ávila

21 Foro científico
Vacunas anti-COVID-19: Incertidumbres y transparencia. *Por Kanta Subbarao*

52 Filosofía de la ciencia
Polémica vegetal.
Por Fernando Calderón Quindós

54 Planeta alimentación
Complementos alimenticios, interferón y COVID-19
Por José Manuel López Nicolás

84 Curiosidades de la física
Conducir sin sacudidas. *Por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik*

88 Juegos matemáticos
La hipótesis de Riemann (II). *Por Bartolo Luque*

92 Libros
Un manual para asaltar los cielos.
Por Miguel Á. Vázquez-Mozo
La historia de la ciencia como historia del hacer científico. *Por José Manuel Chillón*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

La electrónica habitual se basa en la manipulación de la carga de los electrones. La espintrónica, que emplea también su espín, es uno de los enfoques que buscan fabricar dispositivos más eficientes inspirados en el funcionamiento del cerebro, donde no existe separación física entre las unidades de memoria y las de procesamiento (las sinapsis y las neuronas). Ilustración de Getty Images/Laremenko/Istock.



redaccion@investigacionyciencia.es



Noviembre 2020

EL ÉXITO DE *HOMO SAPIENS*

En «El rompecabezas del origen humano» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2020], Kate Wong afirma que «la hibridación interespecífica pudo contribuir al éxito de *H. sapiens*». Pero este razonamiento parece endeble, ya que, por el mismo motivo, el éxito evolutivo podría también haberse decantado por otra de las especies con que hibridó la nuestra; en particular, por *H. neanderthalensis*. Como consecuencia, habría que buscar la explicación de nuestro éxito en alguna causa intraespecífica, en algún rasgo clave que haya diferenciado a *H. sapiens* de otros humanos.

Dice José Luis Pinillos en *Principios de psicología* que «la insólita expansión cefálica experimentada por los homínidos [...] parece haberse hecho sentir más en los lóbulos frontales, que son los que, a juicio de los paleoantropólogos, definitivamente separan o demarcan al hombre de Cromañón de su cercano pariente de Neandertal». La mayor protuberancia de los lóbulos frontales de *H. sapiens* implica una ampliación de la zona de la neocorteza que los recubre, que es la que interviene en el pensamiento ejecutivo, marcarse fines y planificar. Esto sí pudo suponer una ventaja adaptativa de nuestra especie con respecto a otras especies humanas ya extintas, como ejemplifican técnicas de caza: mientras que *H. neanderthalensis* utilizaba lanzas de madera, con las que era preciso acercarse a la pieza para cazarla, *H. sapiens* inventó el lanzador de azagayas, que permitía la caza a distancia y una mayor eficacia en la obtención de alimento. Tales cambios contribuyeron sin duda a la pervivencia de nuestra especie. Es este pensamiento creativo el instrumento que ha llevado al hombre hasta la Luna.

José Enrique García Pascua
Torrecaballeros, Segovia

HUMANOS FRENTE A MÁQUINAS

En el artículo «La pregunta por el ser humano» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2020], Alfredo Marcos menciona que «se indaga la posibilidad de poner al humano en simbiosis con los sistemas de inteligencia artificial, o de sustituirlo directamente por estos». ¿Sustituir al humano por inteligencia artificial? Esta afirmación resulta infundada, aunque se encuentra muy extendida y no faltarán quienes la suscriban. Parece haberse instalado en el subconsciente colectivo en nuestro tiempo.

La pretensión de que mediante la inteligencia artificial, la robótica u otras derivaciones de las tecnologías digitales se llegue a alcanzar algo que recuerde, siquiera remotamente, al ser humano (o a los seres vivos en general) evoca lo que sucedió en el siglo xvii, cuando, fascinados por las máquinas, las cuales están formadas por mecanismos elementales fácilmente comprensibles, algunos eminentes filósofos, como Descartes, llegaron a pensar que los seres vivos no eran sino máquinas; en el caso del ser humano, dotada con alma a través de la glándula pineal. Así surgió el mecanicismo, con sus secuelas del reduccionismo y el materialismo, que sirvió de soporte intelectual a la entonces naciente ciencia moderna. Hasta bien entrado el siglo xix, los físicos pretendían encontrar el mecanismo subyacente a los fenómenos que trataban de comprender. Todo se podía reducir a materia y energía, como sucede con las máquinas, y así se sentaron los fundamentos de lo que posteriormente sería la ciencia física, para la que esos dos conceptos primitivos forman los fundamentos últimos de su admirable construcción intelectual.

La aparición de la información como nuevo concepto primitivo ha suscitado expectativas semejantes a las del siglo xvii. En efecto, el concepto de información —que surge también, como en el caso de las máquinas, del ámbito de la técnica— ha llevado a pensar que mediante tecnologías informáticas se podrá emular la mente humana. La idea resulta tan ilusoria como la de aquel siglo, la cual hoy nos provoca una cierta sonrisa, como sin duda la pretensión actual se la provocará a nuestros descendientes. Tanto en un caso como en otro, hemos de asumir que no somos máquinas, que tan solo las construimos.

Javier Aracil
Profesor emérito de la Universidad de Sevilla
Real Academia de Ingeniería

Responde Marcos: *Agradezco el comentario del profesor Aracil y coincido en lo esencial con sus apreciaciones. He argumentado en un sentido parecido en el artículo «Información e inteligencia artificial»* (Apeiron, *n.º 12, págs. 73-82; abril de 2020), donde concluyo que «en relación a la llamada IA, podríamos decir que lo que tiene de inteligente no es artificial y lo que tiene de artificial no es inteligente».*

Errata corrige

Como nos advierte nuestro lector Pedro A. Valenzuela, en el artículo **Un siglo de matemáticas recreativas** [por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, noviembre de 2020] falta el término lineal en el desarrollo de la función exponencial que aparece en la última página. La expresión correcta es $e^x = 0 + 1 + x + x^2/2 + x^3/6 + ...$

Por un error de edición, el artículo **Cómo conseguir una buena ventilación** [Investigación y Ciencia, diciembre de 2020] omitió la autoría de Benoît Semin junto a la de Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik. Además, el centro de trabajo de estos dos últimos es la Universidad París-Sorbona, no la Universidad Pierre y Marie Curie. Agradecemos a Courty y al Colegio Oficial de Físicos estas observaciones.

En el artículo **Rivalidad entre aves rapaces** [por Jesús Bautista-Rodríguez, José María Gil-Sánchez y Ginés Jesús Gómez; Investigación y Ciencia, diciembre de 2020], se indica que los programas de conservación los dirigió la Asociación Wilder South, cuando en realidad lo hizo la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía.

Estos errores han sido corregidos en la edición digital de los artículos correspondientes.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



Un campo de cultivo actual que aprovecha los sedimentos y el agua que dejó un evento de El Niño cerca de la pampa de Mocan (*1*). Vistas de un antiguo campo de cultivo y canales (*2 y 3*).




3

ARI CARAMANICA (1 y 3); LUIS JAIME CASTILLO BUTTERS (2)

ARQUEOLOGÍA

Los canales de El Niño

Los agricultores peruanos de hace 2000 años aprovechaban las inundaciones provocadas por este fenómeno climático

La costa norte de Perú alberga uno de los desiertos más secos del mundo, excepto cuando El Niño lo anega con enormes inundaciones. Las aguas pluviales procedentes de las laderas andinas se precipitan por los barrancos resecos, y a menudo arrasan los campos agrícolas ubicados en las vegas ricas en sedimentos de los contados ríos del desierto.

Ari Caramanica, arqueóloga de la Universidad del Pacífico de Lima, llevaba tiempo intrigada por lo que parecían antiguas «estructuras» largas y rectas que cruzaban partes de ese desierto, conocido como la pampa de Mocan. Caramanica advirtió esas extrañas líneas en unas fotografías de la década de 1940. Ahora, ella y sus colaboradores sostienen que se construyeron en la época prehispánica y que formaban un elaborado sistema de canales de uso variable (normalmente conducían agua de los ríos, pero también aprovechaban las inundaciones de El Niño cuando se producían) ideado para sobrevivir y prosperar en un entorno hostil.

El fenómeno de El Niño es difícil de predecir, pues ocurre en ciclos irregulares de entre seis y veinte años. Pero la nueva investigación de Caramanica y su equipo sugiere que los agricultores que vivieron en Perú entre los años 1 y 1476 d.C. estaban preparados. Los científicos examinaron el registro arqueológico de la pampa de Mocan para desvelar cómo sacaban partido a las inundaciones de El Niño. El estudio se ha publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

Tras analizar herramientas agrícolas desechadas, restos de plantas o las ubicaciones de los campos de cultivo, el equipo determinó que los agricultores empleaban los canales de manera selectiva para dirigir las crecidas provocadas por El Niño hacia los terrenos más alejados de los ríos, allí donde no llegaban sus sistemas habitua-

les de irrigación. Algunos de esos campos estaban rodeados de montículos bajos que facilitaban la acumulación de agua. Los antiguos agricultores-ingenieros también levantaron pilas de pequeñas rocas para ralentizar el movimiento del agua y recoger limo fértil.

Al principio, Caramanica supuso que los canales fotografiados formaban parte de un sistema de irrigación más tradicional. Pero su equipo descubrió que desempeñaban diferentes funciones: algunas de esas estructuras actuaban incluso como campos de cultivo cuando los estragos de El Niño las aislaba de los ríos. «Las improvisaban continuamente, para aprovechar el momento y el lugar donde aparecía el agua», asegura la investigadora.

En cambio, según Caramanica, la agricultura moderna de la región está dominada por grandes terratenientes o compañías que plantan un único cultivo y usan los campos durante todo el año, y carece de la adaptabilidad que ofrecerían explotaciones más pequeñas.

«Tiene que ver con la percepción del entorno», señala Jason Nesbitt, arqueólogo de la Universidad Tulane, que no participó en el estudio pero escribió un comentario que lo acompaña. Hoy muchos consideran los eventos de El Niño como algo extraordinario, afirma, mientras que para los antiguos residentes de la pampa de Mocan constituían un fenómeno esperado; esa mentalidad podría ayudar a los agricultores actuales a lidiar con las condiciones meteorológicas extremas. Al diseñar políticas agrícolas o de gestión de catástrofes, concluye Nesbitt, «quizá deberíamos contar con arqueólogos y antropólogos para tomar ciertas decisiones».

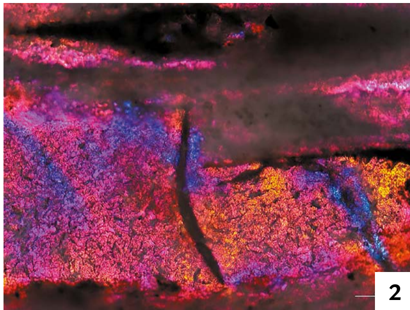
—Lakshmi Supriya

PALEONTOLOGÍA

Vermes en la sangre

El peroné de un titanosaurio alberga lo que parecen ser docenas de parásitos minúsculos





El estado lamentable de un hueso de titanosaurio (*1*) podría tener su causa en unos parásitos vermiformes (*2*).

Hace unos 80 millones de años, en lo que ahora es Brasil, un dinosaurio vagaba cojo. El peroné de una de sus patas estaba tan enfermo que había adquirido una consistencia esponjosa. La alteración habría sido causada por un ser especialmente macabro: un parásito vermiforme que se retorcía a través de sus vasos sanguíneos. La víctima era un titanosaurio de largo cuello.

Aline Ghilardi, de la Universidad Federal de Río Grande del Norte, en Brasil, y sus colaboradores examinaron la superficie del hueso y lo sometieron a una tomografía (TAC) para descartar como causa del mal el cáncer o la tuberculosis. En un primer momento llegaron a la conclusión de que sufría osteomielitis, una rara afección ósea que provoca una intensa inflamación. Pero al examinar cortes finos del fósil bajo un microscopio de gran aumento, hallaron otra posible causa que les sorprendió: dispersos por las cavidades que antaño ocupaban los vasos sanguíneos del tejido óseo había restos fosilizados de lo que parecían ser una setentena de gusanos diminutos, de la longitud de un ácaro del polvo.

«Nos quedamos boquiabiertos. El descubrimiento no tenía precedentes», afirma Ghilardi. Hasta donde sabe, jamás se habían encontrado organismos en huesos fosilizados de dinosaurio. En un artículo publicado en *Cretaceous Research,* ella y su equipo plantean que esos «gusanos» podrían ser parásitos prehistóricos que habrían causado la infección. No obstante, matizan que la osteomielitis también puede ser provocada por bacterias, hongos y protozoos.

Los filamentos vermiformes recuerdan a otro parásito prehistórico denominado *Paleoleishmania,* pero son entre 10 y 100 veces mayores. Una investigación que se publicará en breve los compara con un amplio abanico de parásitos.

Pero esa no es la única explicación plausible. «No estoy convencido de que sean parásitos o, si lo son, que tengan algo que ver con el deterioro óseo», afirma Tommy Leung, ecólogo y estudioso de la evolución de los parásitos en la Universidad de Nueva Inglaterra, en Australia. Leung no participó en el descubrimiento, pero sí fue el revisor de una versión anterior del artículo.

Si las siluetas vermiformes son realmente seres vivos, pudieron penetrar en el hueso para alimentarse de los restos del dinosaurio, una vez muerto. Pero sus descubridores argumentan que es improbable que eso sucediera, porque no se aprecian fracturas evidentes por las que se hubieran abierto paso.

Las aves y los reptiles actuales sufren los estragos de los parásitos, así que es lógico pensar que también aquejaran a los dinosaurios, afirma el paleobiólogo Paul Barrett, del Museo de Historia Natural de Londres, que tampoco ha participado en la investigación. A su parecer, los objetos fosilizados recuerdan a nematodos.

«Se trata de un estudio sumamente meticuloso, que demuestra que aplicando diversas técnicas, en este caso a un solo hueso, es posible obtener muchísima información sobre la biología de un único dinosaurio», concluye Barrett.

—Chris Baraniuk

HUGO CAFASSO (1); «BLOOD PARASITES AND ACUTE OSTEOMYELITIS IN A NON-AVIAN DINOSAUR (SAUROPODA, TITANOSAURIA) FROM THE UPPER CRETACEOUS ADAMANTINA FORMATION, BAURU BASIN, SOUTHEAST BRAZIL», POR TITO AURELIANO ET AL., EN *CRETACEOUS RESEARCH*, VOL. 118, FEBRERO DE 2021 (2).



TECNOLOGÍA

El volumen de las secuoyas

Los láseres revelan la capacidad para almacenar carbono de los árboles más altos del mundo

Las secuoyas rojas de California (*Sequoia sempervirens*) son los árboles más altos del planeta. Sin embargo, la determinación de sus dimensiones —que resulta clave para establecer cuánto carbono atmosférico almacenan en forma de biomasa— es un proceso plagado de incertidumbres. Las ecuaciones habituales que relacionan el diámetro del tronco con el volumen se basan en una muestra reducida de árboles mucho más pequeños, dado que pocos se atreven a ponerse un arnés y tomar medidas desde una altura equivalente a un edificio de 30 pisos. Pero ahora un grupo de investigadores ha estudiado *S. sempervirens* mediante escaneado láser, una técnica automatizada que proporciona mediciones fiables de la estructura y el volumen de un árbol.

Mathias Disney, científico ambiental del Colegio Universitario de Londres, y sus colaboradores evaluaron 145 secuoyas en un estudio publicado en *Scientific Reports*. Los investigadores emplearon un láser de infrarrojo cercano para enviar miles de millones de pulsos de luz contra los árboles (desde múltiples direcciones) y midieron el tiempo que tardaban en volver reflejados. Eso les permitió componer un mapa detallado de cada árbol, que muestra nudos en la corteza, pequeñas ramas y otros elementos de hasta unos pocos centímetros. «Esta técnica nos ofrece una nueva perspectiva sobre la estructura tridimensional de los árboles», asegura Disney.

Los autores hallaron que el volumen de las secuoyas rojas era alrededor de un 30 por ciento mayor que el predicho por las ecuaciones publicadas, y achacan la discrepancia a que algunos ejemplares de *S. sempervirens* desarrollan troncos adicionales conforme envejecen, un proceso denominado reiteración. A partir de sus observaciones, Disney y su equipo han establecido nuevas relaciones entre el diámetro y el volumen de los árboles de esta especie.

El escaneado láser puede aportar información sobre los bosques vírgenes que es importante de cara a los esfuerzos de conservación, señala Anil Raj Kizha, científico de operaciones forestales de la Universidad de Maine ajeno a la investigación. «En los próximos cinco o diez años», vaticina, «se extenderá su uso».

—Katherine Kornei

FUENTE: «NEW 3D MEASUREMENTS OF LARGE REDWOOD TREES FOR BIOMASS AND STRUCTURE», MATHIAS DISNEY ET AL., EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 10, ART. 16721, OCTUBRE DE 2020.

FÍSICA CUÁNTICA

Moléculas fotoexcitadas

Las moléculas ultrafrías se calientan al interaccionar con el láser que las confina



Debido a nuestro tamaño y nuestra sangre caliente, los humanos rara vez podemos observar la mecánica cuántica en acción. Los físicos lo consiguen usando láseres para enfriar los átomos a temperaturas de hasta billonésimas de grado por encima del cero absoluto. Eso ralentiza su movimiento lo bastante como para verlos obedecer las leyes de la física cuántica. Pero enfriar agregados de varios átomos ha resultado más difícil: esas moléculas ultrafrías tienden a calentarse furtivamente, impidiendo que los investigadores les sigan la pista. Un estudio publicado en *Nature Physics* desvela cómo ocurre este fenómeno, al que los físicos se refieren como «pérdida de moléculas ultrafrías».

Poder ver y controlar mejor las moléculas ultrafrías ayudaría a los científicos a ensamblar una máquina cuántica pieza a pieza, asegura Jun Ye, físico de la Universidad de Colorado en Boulder ajeno al estudio. Pero el calentamiento de las moléculas entorpece el proceso. Pionero de los experimentos con moléculas ultrafrías, Ye advirtió enseguida que algunas de ellas se calentaban al experimentar algún tipo de reacción química.

Yu Liu, investigador de la Universidad Harvard y uno de los autores principales del estudio, explica que su equipo tenía previsto investigar esas reacciones. Pero «lo que vimos durante el proceso nos dio la respuesta a la cuestión» de la pérdida de moléculas ultrafrías, señala. Los investigadores ralentizaron las reacciones químicas entre las moléculas para observar su comportamiento mientras se encontraban en un estado intermedio, que tiene lugar antes de que los reactivos se acaben de transformar en los productos. Dado que las moléculas interaccionan con la luz por medio de fuerzas eléctricas, el equipo empleó láseres para evitar que escaparan.

A temperatura ambiente, no es posible observar ese complejo intermedio debido a su fugaz existencia. Aunque a bajas temperaturas perdura más, los investigadores descubrieron que eso genera un problema: brinda al complejo ultrafrío tiempo para interactuar

BIOLOGÍA

Pistas sobre la regresión de las abejas

El análisis del líquido contenido en la espermateca de la reina indicaría qué factores estresantes afectan a la colmena



La pervivencia de la colmena depende del esperma que guarda la reina.

En la vida de la abeja reina el apareamiento es un breve episodio, pues esta guarda el esperma en un receptáculo del cuerpo, llamado espermateca, para un uso posterior. Pero si no consigue mantener la viabilidad de los espermatozoides, la colmena queda condenada a la desaparición. Este «fracaso de la reina» es uno de los principales factores que explica el declive de las abejas melíferas en numerosos países. Averiguar las razones no resulta una labor sencilla, pues la reina no muestra síntomas evidentes cuando sucede. Ahora un nuevo estudio ofrece un modo de dar con las causas, del que podría surgir una valiosa herramienta diagnóstica para el apicultor.

Ella es la única hembra del enjambre capaz de procrear, y si los espermatozoides dejan de ser viables no puede poner huevos y la población se desploma, explica Alison McAfee, autora principal del estudio e investigadora apícola de la Universidad Estatal de Carolina del Norte. Esto supone un problema importante para la humanidad: puesto que son polinizadores de frutales, como los manzanos o los cítricos, y de hortalizas, como las cucurbitáceas o la cebolla, entre muchos otros, «la contribución económica de las abejas a la agricultura se cifra entre 16.000 y 20.000 millones de dólares, solo en EE.UU.», afirma McAfee, que también trabaja en la Universidad de la Columbia Británica. El cambio climático supone una nueva amenaza para la supervivencia de este insecto imprescindible, pues las investigaciones ya han mostrado que las temperaturas altas también están ligadas a la desaparición de las colmenas.

THOMAS FUCHS (*moléculas*); GETTY IMAGES (*abejas*)

con la luz láser que lo retiene, lo cual calienta las moléculas y provoca que algunas pierdan su condición de ultrafrías.

El hallazgo permitirá a los físicos evitar los láseres que excitan los complejos intermedios. Y la posibilidad de contemplar la interacción entre estos y la luz es prometedora en sí misma. La química de la Universidad Stanford Nandini Mukherjee, que no participó en el estudio, afirma que investigar esos complejos es un «objetivo que persiguen desde hace tiempo quienes estudian los mecanismos de reacción».

Según Liu, el equipo pretende emplear luz láser para controlar por completo las reacciones. Y el otro autor principal del trabajo, Ming-Guang Hu (también de Harvard), añade que este proceso podría esclarecer por qué las reglas de la mecánica cuántica hacen que las reacciones con moléculas ultrafrías sean distintas a las que se producen a temperatura ambiente. Tras haber resuelto un misterio que llevaba tiempo importunando a los físicos, ahora aspiran a explicar muchos otros aspectos de la química cuántica.

—Karmela Padavic-Callaghan

Para examinar el fracaso de la reina, McAfee y sus colaboradores efectuaron una «autopsia molecular» en que analizaron el líquido del interior de la espermateca en reinas que habían sido expuestas a un calor tórrido, un frío intenso o plaguicidas. De ese modo comprobaron que cada factor de estrés aparecía asociado con niveles elevados de diversas proteínas presentes en el líquido.

Identificaron las dos proteínas más elevadas como indicadores de cada factor de estrés. Cuando analizaron ambas en reinas con problemas donadas por apicultores de la Columbia Británica, descubrieron que indicaban la exposición a plaguicidas y al calor tórrido, pero no al frío intenso. Los resultados se publicaron en un artículo en *BMC Genomics*.

McAfee y sus colaboradores están usando esos resultados para diseñar una prueba diagnóstica que discrimine entre las diversas causas del fracaso. Aunque la prueba está en fase preliminar, Susan Cobey, investigadora apícola en la Universidad Estatal de Washington, que no ha participado en el estudio y regenta una empresa de inseminación de reinas, está entusiasmada con sus posibilidades: «Sería fantástico poder averiguar lo que les está pasando [a las reinas] y tomar medidas de prevención que evitasen las pérdidas en el campo».

—Karen Kwon



La erupción explosiva del monte Tarawera en 1886 podría haber sido inducida por pequeños cristales conocidos como nanolitos.

ROD HIL, GETTY IMAGES

VULCANOLOGÍA

Erupciones explosivas

La formación de pequeños cristales en el magma podría provocar erupciones de una violencia inesperada

Los volcanes considerados apacibles, que expulsan flujos uniformes de lava, en ocasiones entran en erupción de forma explosiva y sin previo aviso: eso hizo el monte Tarawera de Nueva Zelanda en junio de 1886, causando abundantes daños y muertes. Los geólogos llevan tiempo preguntándose por qué los volcanes experimentan estas repentinas y peligrosas transiciones, según Danilo Di Genova, experto en ciencias de la Tierra de la Universidad de Bayreuth.

En un artículo publicado en *Science Advances*, Di Genova y sus colaboradores proponen que ese cambio catastrófico está relacionado con unos granos cristalinos denominados nanolitos, que pueden formarse en el magma ascendente y tienen un tamaño unas cien veces menor que el de una bacteria típica. Los investigadores afirman que esos granos incrementan la viscosidad del magma, lo cual impide que los gases volcánicos escapen de la roca fundida. El consiguiente aumento de presión crea las condiciones idóneas para una explosión violenta.

Gracias a técnicas espectroscópicas y de microscopía electrónica, los científicos hallaron nanolitos en las cenizas de volcanes activos, como el Etna, en Italia, y el Tambora, en Indonesia. Luego examinaron cómo se forman los nanolitos en un tipo de magma relativamente fluido que se convierte en basalto al enfriarse. Ese magma de baja viscosidad suele permitir que los gases escapen fácilmente y produce flujos de lava suaves. Los investigadores obtuvieron nanolitos en el laboratorio fundiendo basalto y enfriándolo con rapidez. Este último proceso es crucial: durante las erupciones, el magma pierde calor a medida que asciende por una chimenea, y el estudio reveló que los nanolitos solo se formarán si tal pérdida energética ocurre a un ritmo apropiado, señala Di Genova.

«El magma es un sistema con muchos componentes, sobre todo silicio y oxígeno», detalla Di Genova. «Contiene otros elementos, como aluminio, calcio y hierro, y este último parece el más relevante para la formación de nanolitos.» La mayoría de los nanolitos son cristales de óxido de hierro con trazas de aluminio, añade el científico. Y esos cristales pueden generarse en diversos tipos de magma, ya que el hierro siempre está presente en el material fundido.

A continuación, los investigadores elaboraron un magma artificial para demostrar que los nanolitos aumentan la viscosidad. Emplearon aceite de silicona (que a temperatura ambiente es tan viscoso como el magma basáltico durante una erupción) y agregaron esferas de vidrio con la forma y el tamaño de los nanolitos. El equipo descubrió que, incluso a concentraciones relativamente bajas, las nanopartículas tienden a agruparse e interrumpir la libre circulación del líquido. En un volcán real, ese aumento repentino de la viscosidad del magma atraparía burbujas del gas liberado. Con el tiempo se alcanzaría una presión suficiente para expulsar el magma a borbotones en vez de en un flujo constante, desencadenando una explosión.

«Es un estudio fascinante, que aborda una cuestión que nos planteábamos desde hacía tiempo», comenta Einat Lev, geóloga de la Universidad de Columbia que no participó en la investigación. «Un reto importante será averiguar cómo añadir esa información a los futuros modelos volcánicos.»

—Harini Barath

GENÉTICA

ADN antiguo conservado en el suelo

La recuperación de este material genético tal vez haga reescribir nuestro conocimiento sobre la última glaciación

A partir de restos óseos y dentales se había deducido que los últimos mamuts de la cuenca del Yukón debieron desaparecer hace unos 12.000 años. Pero una novedosa técnica de obtención de muestras genéticas apunta a que estos colosos podrían haber sobrevivido hasta fechas muy posteriores, compartiendo la tundra ártica con los bisontes y los uapitíes varios milenios más. El relato se conserva en el suelo.

Los huesos constituyen una fuente excelente de información genética prehistórica, pero no la única; restos biológicos que van desde las células de la piel desprendidas durante la glaciación hasta acículas de pino pueden contribuir al registro genético que se conserva en el barro. Los paleogenetistas llevan mucho tiempo extrayendo y analizando «ADN ambiental» obtenido del suelo, pero deshacerse de todo lo sobrante sin destruir los frágiles vestigios de ADN es una tarea abrumadora.

«Las muestras ambientales contienen una enorme cantidad de sustancias que dificultan la purificación del ADN que nos interesa. Y no podemos permitirnos el lujo de perder ni una brizna del que tenemos», afirma Tyler Murchie, genetista de la Universidad McMaster. En un trabajo publicado en *Quaternary Reports*, él y su equipo describen técnicas menos drásticas con las que se recuperan hasta 59 veces más material genético que con otros métodos.

Con la nueva técnica, las muestras de suelo se someten al proceso de extracción con un cincel esterilizado y se fragmentan en trozos más pequeños, se agitan y se someten a una centrifugación en frío para separar la mayor cantidad posible de ADN. A continuación, este se confronta con una colección de secuencias de ADN, o genoteca, para detectar coincidencias con una especie conocida.

«Con estas técnicas no solo obtenemos más cantidad de ADN, sino que este es más diverso», aclara Chris Widga, paleontólogo de la Universidad Estatal de Tennessee Oriental, ajeno al nuevo estudio. «Comenzamos a conseguir más matices, parece que realmente hay posibilidades de registrar segmentos más amplios del ecosistema.»

La gran panorámica se obtiene a partir de muestras pequeñas, explica Murchie: «Gracias a la combinación de nuestras innovadoras técnicas de extracción y enriquecimiento, conseguimos genomas enteros de varias especies extintas al mismo tiempo, todo con menos de un gramo de sedimento».

Pero no todo son ventajas: la metodología adolece de limitaciones, pues requiere saber qué ADN se va a buscar. Si, por ejemplo, la genoteca no contiene una especie de felino con dientes de sable, el análisis no puede detectarlo. En cambio, el proceso puede brindar información sumamente interesante de las especies conocidas. En su estudio, los autores detectaron alrededor de 2100 tipos de plantas y 180 de animales, entre ellos caballos americanos y mamuts lanudos, en muestras de suelo datadas miles de años después de su presunta extinción.

Los datos de otros yacimientos, aún no publicados, están arrojando resultados parecidos, adelanta Murchie, y los futuros descubrimientos de fósiles podrían reforzar los argumentos. «Este enfoque nos servirá para identificar especies en lugares y en momentos que ni siquiera habríamos sospechado, lo que nos orientará hacia la búsqueda de sus restos en zonas que no se nos habría ocurrido nunca examinar», añade. —*Riley Black*



ALAMY

ASTRONOMÍA

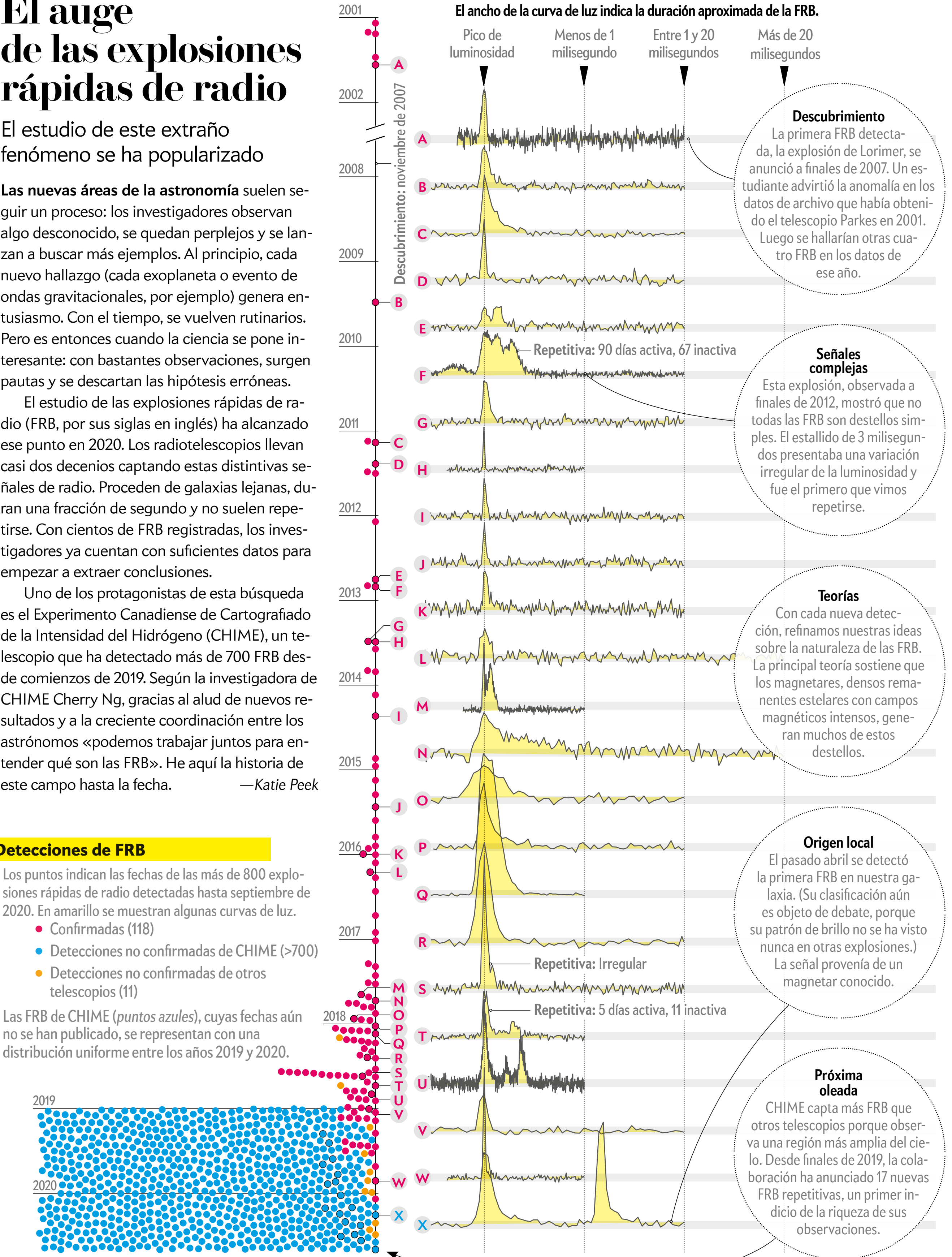
El auge de las explosiones rápidas de radio

El estudio de este extraño fenómeno se ha popularizado

Las nuevas áreas de la astronomía suelen seguir un proceso: los investigadores observan algo desconocido, se quedan perplejos y se lanzan a buscar más ejemplos. Al principio, cada nuevo hallazgo (cada exoplaneta o evento de ondas gravitacionales, por ejemplo) genera entusiasmo. Con el tiempo, se vuelven rutinarios. Pero es entonces cuando la ciencia se pone interesante: con bastantes observaciones, surgen pautas y se descartan las hipótesis erróneas.

El estudio de las explosiones rápidas de radio (FRB, por sus siglas en inglés) ha alcanzado ese punto en 2020. Los radiotelescopios llevan casi dos decenios captando estas distintivas señales de radio. Proceden de galaxias lejanas, duran una fracción de segundo y no suelen repetirse. Con cientos de FRB registradas, los investigadores ya cuentan con suficientes datos para empezar a extraer conclusiones.

Uno de los protagonistas de esta búsqueda es el Experimento Canadiense de Cartografiado de la Intensidad del Hidrógeno (CHIME), un telescopio que ha detectado más de 700 FRB desde comienzos de 2019. Según la investigadora de CHIME Cherry Ng, gracias al alud de nuevos resultados y a la creciente coordinación entre los astrónomos «podemos trabajar juntos para entender qué son las FRB». He aquí la historia de este campo hasta la fecha. —*Katie Peek*

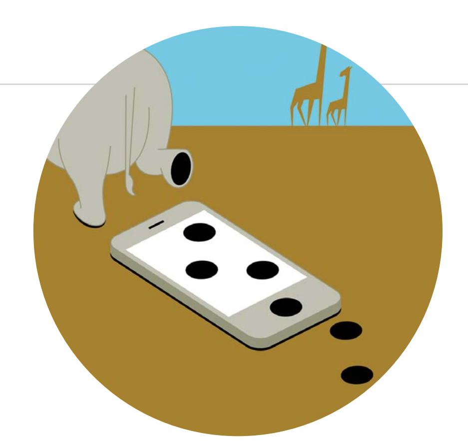


FUENTES: CATÁLOGO DE FRB (HTTP://FRBCAT.ORG); EXPERIMENTO CANADIENSE DE CARTOGRAFIADO DE LA INTENSIDAD DEL HIDRÓGENO (CHIME); KATIE PEEK (*gráfico*)

CONSERVACIÓN

Huellas de rinoceronte

Una técnica inspirada en los rastreadores indígenas ayuda a controlar a estos herbívoros



La demanda internacional de cuernos de rinoceronte negro ha promovido durante décadas la matanza de estos animales en países como Namibia, Zimbabue y Sudáfrica. Se calcula que en 1960 quedaban unos 100.000 ejemplares, y en 1995 no llegaban a 2500. Las campañas de conservación han elevado la cifra hasta los 5600 rinocerontes actuales, pero la especie sigue en peligro crítico, y la caza furtiva es una de las mayores amenazas.

Los científicos buscan protegerlos siguiendo sus desplazamientos con dispositivos GPS sujetos al cuello o a los tobillos, o implantados en los cuernos. Los datos permiten controlar el número de rinocerontes y saber si se adentran en lugares frecuentados por los furtivos. Pero los aparatos sufren averías y para colocarlos hay que sedar a los animales, lo cual puede resultar nocivo.

Un estudio reciente publicado en *PeerJ* describe un nuevo método de seguimiento que emplea teléfonos inteligentes para registrar las pisadas de los rinocerontes. Esta «técnica de identificación de huellas» (TIH) incluye un programa informático que analiza los movimientos de los animales para mantenerlos a salvo de los furtivos.

La idea surgió a raíz de la colaboración con rastreadores locales de Zimbabue. Estos expertos en huellas saben reconocer un rinoceronte concreto a partir de la forma de sus pezuñas y (si se aprecian) de las marcas que dejan las grietas de las almohadillas del talón, tan distintivas como nuestras huellas dactilares. «De no ser por los rastreadores, quizás no habríamos pensado en las pisadas», admite Sky Alibhai, cofundador de la organización conservacionista WildTrack y uno de los autores principales del estudio.

Para usar el nuevo método, los científicos fotografían las huellas de rinoceronte con una aplicación móvil y las suben a una base de datos mundial. El análisis mediante la TIH permite identificar el animal y determinar su edad y sexo con una precisión del 99 por ciento. También es posible estimar el número de ejemplares que hay en una zona y vigilar sus desplazamientos.

Alibhai y Zoe Jewell, cofundadora de WildTrack y coautora principal del artículo, están enseñando a usar la TIH a conservacionistas, gestores de tierras, guías locales y guardas forestales de Namibia, hogar del 28 por ciento de los rinocerontes negros del planeta. Y ya han adaptado la técnica a otros animales, como el león africano, el tigre de Bengala o la nutria europea.

Ciska Scheijen, científica del colectivo sudafricano Rockwood Conservation ajena al estudio, opina que «es un gran método para supervisar y censar a los animales». Con todo, se pregunta si la TIH será efectiva en la época de lluvias, cuando las huellas se desdibujan, y si servirá para seguir a grandes conjuntos de animales, en vez de los 35 ejemplares incluidos en el nuevo trabajo.

Los animales amenazados suelen vivir en grupos pequeños o estar desperdigados, replica Jewell, pero «la TIH permite ampliar la escala, y nos encantaría aplicarla a especies en peligro que conformen poblaciones más numerosas». —*Helen Santoro*

METEOROLOGÍA ESPACIAL

La ionosfera sobre África

Un conjunto de sensores vigilarán las emisiones solares que amenazan las señales GPS y de radio

Una nueva red de antenas en África estudiará los estragos que causan las tormentas de partículas cargadas procedentes del Sol en las comunicaciones por radio y vía satélite. El pasado marzo, Zambia instaló el primero de los ocho receptores multifrecuencia que se están desplegando por el continente y que se sumarán a otros cuatro que ya funcionan en Sudáfrica. Kenia y Nigeria pronto tendrán los suyos.

La red se integrará en un centro de meteorología espacial que comenzará a operar en Sudáfrica en 2022, y aportará datos en tiempo real sobre el modo en que las tormentas solares alteran la ionosfera, la capa ionizada de la atmósfera superior. Esa distorsión puede ser peligrosa, advierte Mpho Tshisaphungo, investigadora de la Agencia Espacial Nacional de Sudáfrica (SANSA). Las señales entre los satélites y la superficie atraviesan esa región, donde las partículas cargadas pueden generar interferencias. Y las ondas de radio de alta frecuencia que emplean a menudo los servicios de defensa y emergencia deben rebotar en la ionosfera; según Tshisaphungo, las perturbaciones debidas a las tormentas solares «pueden hacer que la ionosfera atenúe, retrase o absorba esa señal de radio».

Sudáfrica ya aporta a las redes mundiales datos periódicos acerca de la porción de la ionosfera situada sobre el país, basados en la información satelital y terrestre obtenida por distintos programas internacionales de meteorología espacial. Gracias a la nueva red, África tendrá acceso ininterrumpido a los efectos locales que produce el Sol en su atmósfera, aseguran los investigadores.

«Aunque existan datos internacionales, si queremos observar lo que ocurre en el continente africano, hay que realizar las medidas en África», sostiene John Bosco Habarulema, científico espacial de la SANSA. El año pasado, Habarulema, Daniel Okoh (investigador de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo Espacial de Nigeria) y sus colaboradores desarrollaron un modelo que predice la densidad de electrones en la ionosfera y sirve para completar vacíos en las mediciones. (Tshisaphungo también participó en ese estudio.) Los nuevos receptores locales aumentarán la precisión del modelo y permitirán que describa las fluctuaciones en todo el continente.

«Necesitamos introducir esos datos en nuestros modelos globales, para tener una perspectiva completa», indica Terry Onsager, físico del Centro de Predicción del Clima Espacial de EE.UU. Y modelizar el comportamiento de la ionosfera resulta crucial, concluye, porque «dependemos cada vez más de tecnologías sensibles a la meteorología espacial». —*Sarah Wild*

THOMAS FUCHS

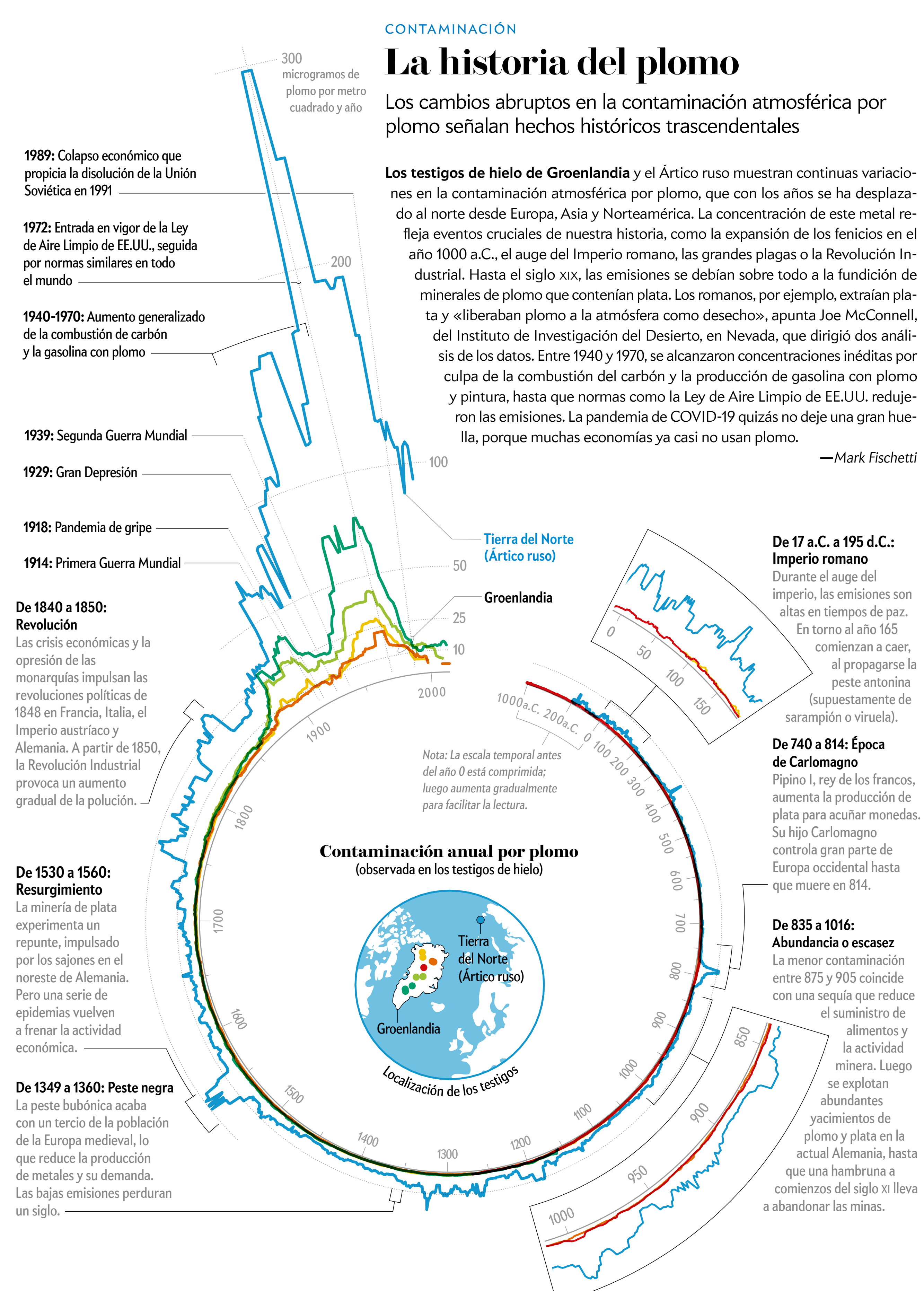
CONTAMINACIÓN

La historia del plomo

Los cambios abruptos en la contaminación atmosférica por plomo señalan hechos históricos trascendentales

Los testigos de hielo de Groenlandia y el Ártico ruso muestran continuas variaciones en la contaminación atmosférica por plomo, que con los años se ha desplazado al norte desde Europa, Asia y Norteamérica. La concentración de este metal refleja eventos cruciales de nuestra historia, como la expansión de los fenicios en el año 1000 a.C., el auge del Imperio romano, las grandes plagas o la Revolución Industrial. Hasta el siglo XIX, las emisiones se debían sobre todo a la fundición de minerales de plomo que contenían plata. Los romanos, por ejemplo, extraían plata y «liberaban plomo a la atmósfera como desecho», apunta Joe McConnell, del Instituto de Investigación del Desierto, en Nevada, que dirigió dos análisis de los datos. Entre 1940 y 1970, se alcanzaron concentraciones inéditas por culpa de la combustión del carbón y la producción de gasolina con plomo y pintura, hasta que normas como la Ley de Aire Limpio de EE.UU. redujeron las emisiones. La pandemia de COVID-19 quizás no deje una gran huella, porque muchas economías ya casi no usan plomo.

—Mark Fischetti



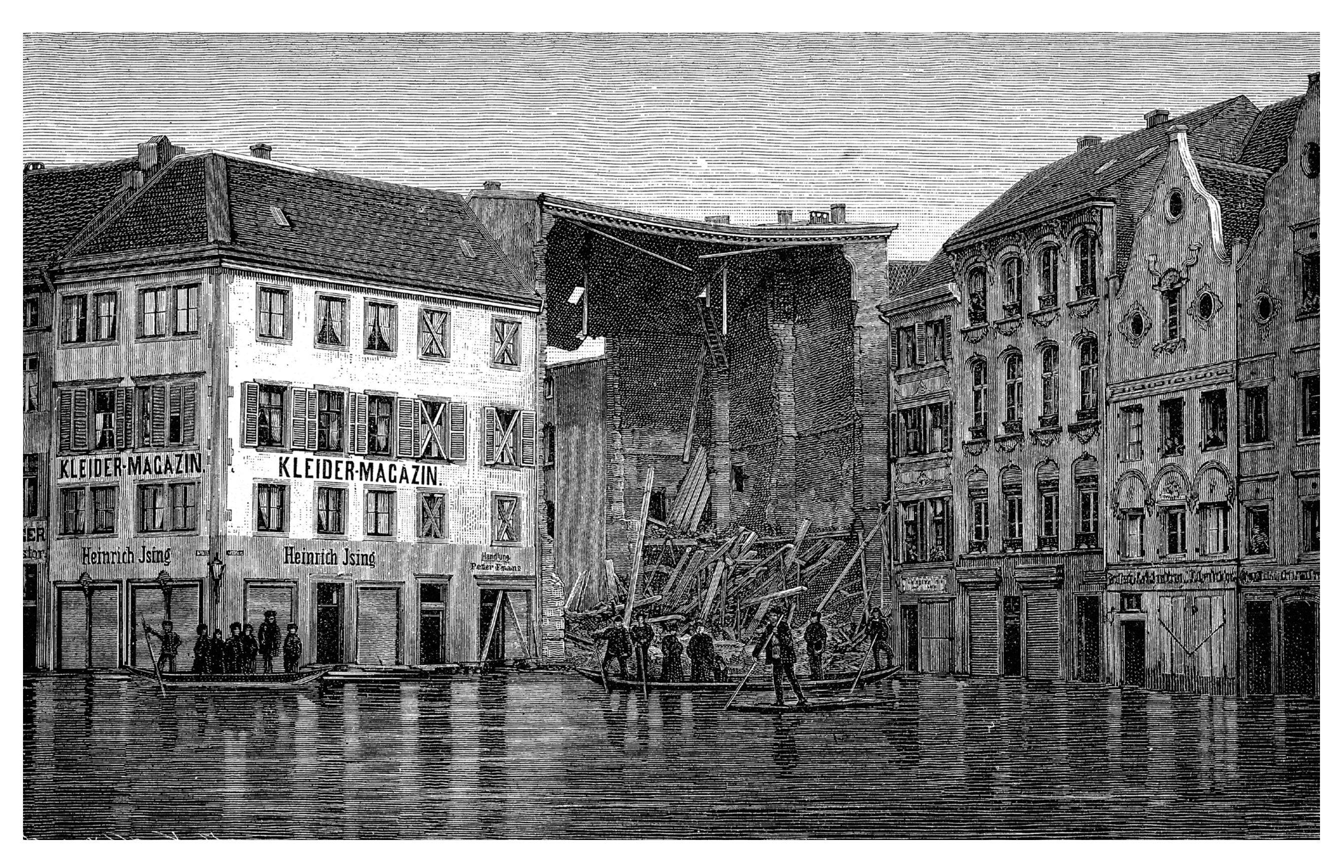
FUENTES: «LEAD POLLUTION RECORDED IN GREENLAND ICE INDICATES EUROPEAN EMISSIONS TRACKED PLAGUES, WARS, AND IMPERIAL EXPANSION DURING ANTIQUITY», POR J. R. MCCONNELL ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 115, N.° 22, MAYO DE 2018; «PERVASIVE ARCTIC LEAD POLLUTION SUGGESTS SUBSTANTIAL GROWTH IN MEDIEVAL SILVER PRODUCTION MODULATED BY PLAGUE, CLIMATE, AND CONFLICT», POR J. R. MCCONNELL ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 116, N.° 30, JULIO DE 2019; NADIEH BREMER (*gráfico*)

CLIMATOLOGÍA HISTÓRICA

Cinco siglos de inundaciones en Europa

Gracias al rico patrimonio documental del continente, se ha reconstruido la historia de sus inundaciones. El esfuerzo podría ayudar a los gestores a hacer frente a futuros episodios

FRANCIS LUDLOW Y RHONDA MCGOVERN



GRABADO que ilustra las inundaciones de Düsseldorf en noviembre de 1882, con una casa derrumbada en la plaza del Castillo.

Se cree que, entre 1870 y 2016, las inundaciones afectaron cada año al 0,03 por ciento de la población europea por término medio, con una merma aproximada de entre el 0,8 y el 0,9 por ciento del producto interior bruto. En los años venideros, ante el más que probable aumento del riesgo de inundaciones a causa del cambio climático, las pérdidas podrían ser mucho más cuantiosas si no se realizan las labores de ordenación y adaptación adecuadas.

Dichas medidas deben basarse en datos rigurosos y requieren un conocimiento preciso de los patrones que siguen estos fenómenos a largo plazo. Los responsables políticos deben saber si vivimos en un período de inundaciones abundantes (caracterizado por su mayor frecuencia, magnitud o extensión) o de inundaciones escasas. Las grandes inundaciones son un fenómeno infrecuente para cualquier cuenca fluvial en un año determinado, pero el riesgo acumulativo es más alto si se tiene en cuenta el conjunto de una región amplia como es Europa. Así, cuanto más tiempo y territorio abarquen estos registros históricos, más útil será la información que proporcionen.

En un artículo reciente, Günter Blöschl, de la Universidad Técnica de Viena, junto con científicos de distintos centros europeos (entre ellos, la Universidad de Barcelona, el Museo de Nacional de Ciencias Naturales y la Universidad de Almería), han utilizado el rico patrimonio documental del continente para reconstruir la historia de sus inundaciones en los últimos cinco siglos. Han aprovechado un ingente corpus de documentos para trazar una historia de las inundaciones en 103 tramos de grandes ríos europeos entre los años 1500 y 2016 de nuestra era. El estudio ha revelado nueve períodos de importantes inundaciones que afectan a zonas concretas de Europa. El último de ellos, en el que podríamos estar inmersos todavía, tiene diferencias fundamentales respecto a los

GETTY IMAGES/CLU/ISTOCK

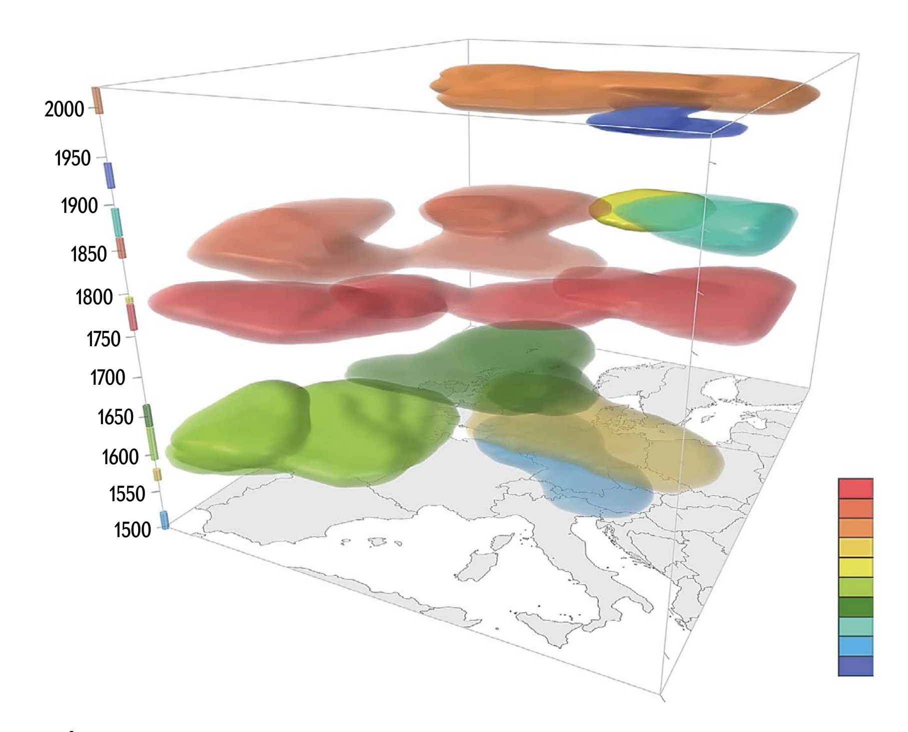
anteriores. El trabajo podría ayudar a los gestores políticos a hacer frente a las inundaciones en el futuro.

¿Cuán válidas son las pruebas documentales?

Por suerte, el patrimonio documental de Europa es de los más variados y ricos del mundo. En su haber se cuentan desde anales y crónicas hasta archivos legales y administrativos, correspondencia y periódicos. Estas fuentes están repletas de observaciones de fenómenos extremos y desastres naturales, por su enorme trascendencia para las poblaciones humanas, su espectacularidad y el significado religioso que se les atribuía como malos augurios o castigos divinos. Por ejemplo, en los anales de Connacht de 1471, escritos en gaélico irlandés, se lee lo siguiente: «El día antes y después de la festividad de Beltaine [1 de mayo] cayeron tormentas de granizo, acompañadas de relámpagos y tronidos, arruinando muchas plantas en flor, frutas y legumbres en todas las contradas de Irlanda donde descargaron. En una de esas granizadas, en el este, llovieron pedriscos de dos o tres pulgadas [entre 5 y 8 centímetros], los cuales infirieron grandes heridas a quienes golpearon. [...] Hubo otra en el monasterio de Boyle; y, según cuentan las gentes del lugar, podría haberse botado una nave sobre el pavimento de la iglesia mayor».

Ese relato hace relucir la fuerza de las pruebas documentales: la datación es precisa, su encuadre espacial es detallado, no hay ambigüedad sobre las condiciones meteorológicas descritas y es explícito en cuanto al impacto humano. Estos archivos se utilizan como base de estudio en la climatología histórica, una disciplina que se remonta al menos a la década de 1920 y que se aceleró entre los años 60 y 70 gracias a pioneros como Hubert Lamb y Hermann Flohn. Su trabajo reforzó la noción de que en los últimos siglos se habían producido cambios climáticos con consecuencias sociales, y desmontó la idea de que la dinámica climática plurisecular se había mantenido constante.

A pesar de la evolución continua de este campo, el historiador del clima Christian Pfister y el meteorólogo Heinz Wanner, ambos de la Universidad de Berna, señalaban en un artículo de 2002 que «muchos científicos opinan que las observaciones realizadas en épocas preinstrumentales son "subjetivas" y menos fidedignas que los indicadores ambientales».



PERÍODOS RICOS EN INUNDACIONES en distintas regiones de Europa en los últimos 500 años. Los períodos están coloreados según la abundancia (frecuencia y magnitud) de las inundaciones, de mayor (*rojo*) a menor (*azul oscuro*).

Pero a continuación señalaban que «una vez calibrados y verificados, [...] los datos son precisos y tienen una resolución espaciotemporal que no aportan otros indicadores climáticos». Desde entonces, los especialistas en climatología histórica no han dejado de buscar datos, de elaborar métodos para valorar su credibilidad y de cuantificarlos a fin de reconstruir el clima de épocas pasadas.

Relación entre inundaciones y temperaturas

Partiendo de esos proyectos iniciales, Blöschl y sus colaboradores han realizado una contribución importantísima a nuestro conocimiento histórico de las inundaciones, gracias a la recopilación detallada de 9576 episodios.

Las precipitaciones son más variables en el espacio que las temperaturas y, por tanto, más difíciles de reconstruir. Deducir la historia de las inundaciones es todavía más difícil si cabe, porque dependen no solo de las precipitaciones, sino también del uso que hacen los humanos del terreno, desde la deforestación en los cursos altos hasta la construcción de embalses, puentes y asentamientos urbanos. También guardan relación con las temperaturas prevalentes, que tienen una variación estacional y regional en toda Europa y que influyen sobre la evaporación, la humedad del suelo y el inicio del deshielo primaveral. Cabe señalar, en este sentido, que el nuevo trabajo establece una asociación cronológica entre los períodos de abundancia de inundaciones y las temperaturas inferiores a la media. En cambio, el último período de inundaciones abundantes (comprendido entre 1990 y 2016, cuando se termina la serie de datos), que afecta a la Europa central y occidental y al norte de Italia, y que es definido por los autores como uno de los más severos, resulta excepcional por producirse con temperaturas en aumento.

Uno de los puntos destacados de este trabajo es el esmero por controlar los sesgos asociados a la variabilidad de las fuentes, tanto por su tipología como por su cantidad, y tanto en el tiempo como en el espacio, un problema persistente que tiende a reconocerse pero rara vez se corrige. También sobresale la visualización tridimensional de la magnitud, duración y área geográfica de los períodos de inundaciones abundantes (*véase la ilustración*). Estos gráficos invitan a plantearse cuáles son los procesos climáticos endógenos y exógenos que determinan estos períodos, y cómo su expresión regional se manifiesta o se vehicula en los grandes flujos de circulación oceánica y atmosférica.

INUNDACIONES EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA ESPAÑOLA

La larga historia de ocupación humana en la zona y sus condiciones climáticas particulares han determinado la gravedad de los episodios

MARIANO BARRIENDOS

La preocupación por el cambio climático y sus impactos en el planeta es creciente, no solo a causa del incremento de las temperaturas, sino también de la mayor frecuencia de los episodios meteorológicos extremos, entre ellos las lluvias torrenciales. Dada la incertidumbre de la variabilidad climática, un conocimiento clave que ayuda a desarrollar estrategias de prevención y mitigación frente a estos episodios es la reconstrucción del clima del pasado. Además de diferentes fuentes de información paleoclimática, como los registros sedimentarios y glaciológicos, o los anillos de crecimiento de los árboles, también son de enorme utilidad las fuentes documentales manuscritas y preservadas en archivos históricos.

Numerosos grupos de investigación europeos hemos empleado fuentes documentales y bibliográficas para analizar las lluvias extraordinarias y las inundaciones que estas provocaron en los últimos 500 años, según se detalla en el trabajo encabezado por Günter Blöschl, de la Universidad Técnica de Viena.

Los datos correspondientes a la cuenca mediterránea española han sido analizados por un equipo multidisciplinar de físicos, geólogos, geógrafos, historiadores y economistas, entre los que figuran investigadores de nuestro grupo. Hemos extraído información de libros de actas de autoridades municipales y eclesiásticas, así como de dietarios y libros de memorias privados. También hemos utilizado fuentes impresas, en concreto prensa local, historias locales o informes técnicos.

Afortunadamente, la información básica que hemos obtenido de las diferentes fuentes no presenta apenas variaciones a lo largo del tiempo. Son especialmente constantes las actas municipales de los siglos XIV al XVIII, los informes de autoridades locales de los siglos XIX y XX o la información que aparece en los medios digitales y las redes sociales en el siglo XXI.

Los datos que hemos recuperado para analizar los episodios de inundación son diversos: fecha, duración y localización de los desbordamientos; condiciones meteorológicas (tipo, duración y extensión de la lluvia); impactos directos en infraestructuras con descripción y valoración de los daños en la población (problemas de movilidad, interrupción del suministro de electricidad, gas o agua); informaciones cuantificables que permiten la modelización hidráulica (cotas de agua alcanzadas, perímetro de las zonas inundadas y otros aspectos indirectos, como deslizamientos de tierras o rebosamientos); daños personales —aunque actualmente se registran con detalle, en el pasado no era así—.

En esta crónica manuscrita se describe la intensa lluvia que cayó el 27 de agosto de 1389 en la ciudad de Barcelona y que provocó distintos daños, como el derrumbamiento de una parte de la muralla de la ciudad, de parte del monasterio de San Damián, hoy desaparecido, y de varias casas.

El análisis de estos datos nos ha permitido identificar y catalogar 15.661 inundaciones entre 1035 y 2020 en la cuenca mediterránea española. Según los resultados, hemos distinguido cuatro períodos con una alta frecuencia de inundaciones: de 1580 a 1620 y de 1840 a 1880, ambos vinculados a condiciones relativamente frías; y de 1760 a 1800 y de 1982 a la actualidad, vinculados a condiciones relativamente cálidas. Estos cuatro períodos coinciden con los detectados en otras regiones europeas, que por su parte tienen otros períodos de alta frecuencia de inundaciones que afectan solo al centro o al norte del continente.

Bajo las condiciones cálidas, las precipitaciones torrenciales ocasionan a menudo inundaciones relámpago (*flash-flood*). Están provocadas por lluvias muy intensas y de corta duración en zonas localizadas en donde los sistemas fluviales deben evacuar un gran caudal de agua en muy poco tiempo. En la actualidad, los efectos de las inundaciones relámpago se ven agravadas por una mayor presión demográfica y urbanística en el territorio, la cual ha provocado la proliferación de nuevas zonas inundables.

En las fases frías, por otro lado, los archivos nos refieren situaciones que pueden ser incluso peores, con lluvias de efectos catastróficos, tanto en magnitud como en extensión. Las inundaciones pueden producirse en múltiples cuencas simultáneamente, como las de enero de 1626, que afectaron desde el Guadalquivir hasta el Duero, o las del *Any del Diluvi* («Año del Diluvio»), que asolaron la cuenca mediterránea desde Murcia hasta el Rosellón en noviembre de 1617.

Pero los datos históricos nos demuestran que la atmósfera puede sorprendernos. En una fase cálida, aparte de las inundaciones relámpago, pueden producirse episodios de efectos devastadores y de gran extensión, como el de finales de septiembre de 1787, que destruyó miles de viviendas en la cuenca del Ebro, entre Sangüesa y Tortosa. Y en las fases frías también puede haber inundaciones relámpago, como el *Aiguat de Santa Tecla* («Agüacero de Santa Tecla») en el prelitoral catalán, que el 23 de septiembre de 1874, tras cuatro horas de precipitación, dejó 535 fallecidos.

La recopilación de información a partir de documentos históricos resulta de gran valor a la hora de describir tendencias en el clima, un conocimiento que puede ayudarnos a responder a futuros episodios extremos.

Mariano Barriendos *es profesor de la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad de Barcelona.*

Los autores sospechan que uno de esos procesos podría ser la oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), una fluctuación a gran escala en la masa atmosférica entre la zona de Islandia y las Azores que determina la potencia y la dirección hacia Europa de los vientos del oeste en invierno (y el recorrido de las tormentas). Según lo marcada que sea la fluctuación, estos vientos, que vienen cargados de humedad, traen aire relativamente cálido y lluvia al norte y noroeste de Europa, manteniendo el sur del continente seco y fresco, o se dirigen hacia la Europa meridional, dejando el norte y el noroeste expuestos a las incursiones de aire frío y seco del Ártico.

Pero sigue habiendo ambigüedades sobre los mecanismos responsables. Como la estación dominante de las inundaciones no es la misma en cada región (invierno en el norte y noroeste de Europa, pero verano en el centro y el sur, por ejemplo), la NAO, que modula el clima invernal, no lo explica todo. Tampoco está claro cómo influyen las temperaturas prevalentes en los períodos de abundancia de inundaciones. Según apuntan los autores, los modelos de sistemas de escala planetaria, combinados con modelos de procesos hidrológicos, podrían servir para reflejar la complejidad de los fenómenos naturales y humanos sobre el terreno, que potencian o suprimen las inundaciones. También podrían arrojar luz sobre el carácter causativo o correlativo de la asociación entre las temperaturas y los períodos de inundaciones, y dilucidar en qué medida el último período es consecuencia del calentamiento antropógeno.

El trabajo demuestra con claridad el potencial de la climatología histórica, pero quedan otras vías para reconstruir el paleoclima. Los registros escritos sobre el clima son especialmente discontinuos en el pasado más remoto; en cambio, los datos dendrocronológicos (mediciones de la anchura, densidad y composición isotópica de los anillos de crecimiento de los árboles, que se correlacionan con las condiciones climáticas), por ejemplo, ofrecen información más continua a lo largo de períodos prolongados. Sin embargo, dichos datos normalmente reflejan solo el clima de la estación en que crecen los árboles, mientras que los documentos escritos atestiguan todas las épocas del año. Si ambas fuentes se utilizaran con mayor regularidad como complementarias, mejorarían nuestro conocimiento de las señales preservadas en cada una de ellas y ayudarían a resolver contradicciones: por ejemplo, la documentación escrita deja constancia de la gran sequía de 1540, pero los datos dendrocronológicos son más ambivalentes.

Quedan por descubrir fuentes documentales escritas, como los dietarios climáticos, que son muy apreciados en climatología histórica por su anotación estandarizada y sistemática de las circunstancias atmosféricas. Anotaciones de este tipo no solo se han confeccionado en las últimas centurias, sino también en épocas pretéritas, como los increíbles «diarios astronómicos» babilónicos, que recogen observaciones cotidianas durante los primeros siete siglos antes de Cristo, y que siguen sin haberse estudiado en profundidad. Como afirmaban Pfister y Wanner en 2002, «en todo el mundo hay miles de volúmenes con observaciones diarias, pero todavía no se ha analizado la información meteorológica que contienen. ¡Pongámonos manos a la obra!».

Francis Ludlow
*y **Rhonda McGovern***
son investigadores del Centro Trinity de Humanidades Ambientales, de la Escuela de Historias y Humanidades del Trinity College, en Dubblín.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 583, págs. 522-524, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Documentary evidence. Christian Pfister y Heinz Wanner en *Past Global Changes Magazine*, vol. 10, n.º 3, diciembre de 2002.
Changing climate both increases and decreases European river floods. Gunter Blöschl et al. en *Nature*, vol. 573, págs. 108-111, agosto de 2019.
Climatic and social factors behind the Spanish Mediterranean flood event chronologies from documentary sources (14th–20th centuries). Mariano Barriendos et al. en *Global and Planetary Change*, vol. 182, art. 102997, noviembre de 2019.
Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. Gunter Blöschl et al. en *Nature*, vol. 583, págs. 560-566, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

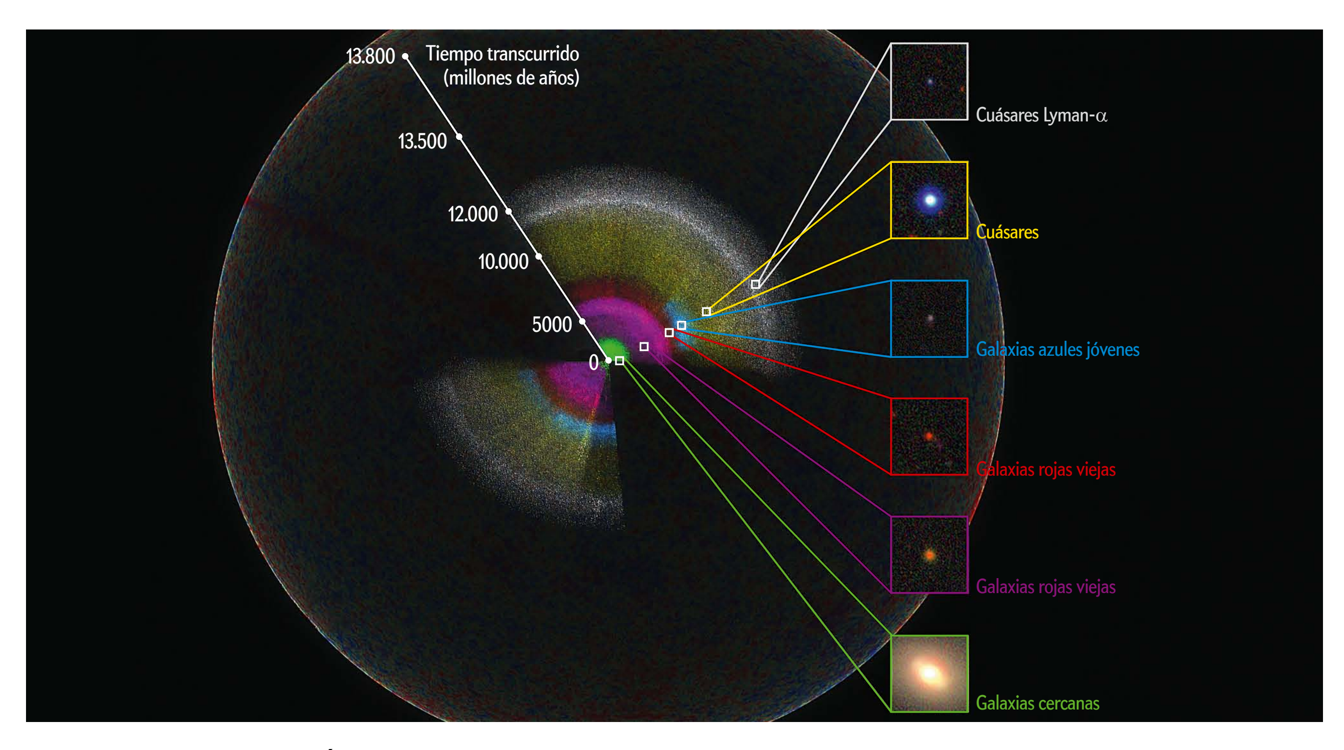
Viene mal tiempo. Jennifer A. Francis en *IyC*, agosto de 2019.

COSMOLOGÍA

El mayor mapa tridimensional del universo

El proyecto eBOSS ha logrado reconstruir la historia de la expansión cósmica durante los últimos 11.000 millones de años. Los resultados aportan pistas clave para entender la energía oscura, la geometría del universo y su tasa de expansión actual

ANDREU FONT-RIBERA, HÉCTOR GIL-MARÍN, SANTIAGO ÁVILA



RECONSTRUIR LA HISTORIA CÓSMICA: El Sondeo Espectroscópico Extendido de Oscilaciones Bariónicas (eBOSS) ha cartografiado más de dos millones de galaxias pertenecientes a seis épocas cósmicas (*imagen*). En este esquema la Tierra está situada en el centro, los colores muestran las posiciones de los distintos tipos de galaxias estudiadas, y la esfera exterior muestra los límites del universo observable.

En 1998 cambió por completo nuestra manera de entender el universo. Aquel año, dos equipos independientes que estudiaban la distancia a supernovas en galaxias lejanas concluyeron que la expansión cósmica se estaba acelerando. Hasta entonces se pensaba que el universo se expandía debido al «empujón» inicial de la gran explosión, pero que, dada la naturaleza atractiva de la gravedad, esa expansión se tornaría cada vez más lenta. Sin embargo, los datos revelaron que ocurría justo lo contrario.

Aquel hallazgo implicaba que, o bien la teoría de la gravedad de Einstein es insuficiente cuando la aplicamos al universo en su conjunto, o bien hay un misterioso ingrediente que impregna todo el espacio y que ejerce el efecto de una «gravedad repulsiva». Este componente se conoce con el nombre de energía oscura y, aunque desconocemos su naturaleza, hoy sabemos que da cuenta de la mayor parte del contenido energético del universo. Desentrañar su origen y propiedades constituye uno de los principales retos a los que se enfrenta la cosmología actual.

Pocos años más tarde, la expansión acelerada del universo fue confirmada por otras observaciones muy distintas. Entre ellas destaca el estudio del fondo cósmico de microondas, la radiación emitida poco después de la gran explosión. Esta luz fue liberada por el plasma de partículas que llenaba el universo cuando este apenas tenía 380.000 años (el 0,003 por ciento de su edad actual, estimada en 13.800 millones de años); es decir, mucho antes de que se formaran las primeras estrellas y las primeras galaxias.

Sin embargo, ¿hace cuánto que se acelera la expansión cósmica? ¿Ha cambiado esa aceleración con el tiempo? Al respecto, los distintos modelos teóricos que intentan explicar la energía oscura hacen predicciones diferentes. Por ello, en los últimos años varios proyectos internacionales han intentado medir con precisión cómo se ha desarrollado el proceso de expansión cósmica desde los inicios del universo hasta la actualidad.

En verano de 2020, el Sondeo Espectroscópico Extendido de Oscilaciones Bariónicas (eBOSS, por su acrónimo en inglés) presentó un nuevo estudio que ofrece una visión complementaria a la incógnita de la expansión cósmica. Este proyecto ha obtenido el que hasta ahora es el mayor mapa tridimensional de la distribución de galaxias lejanas. Gracias a ello, hemos podido reconstruir la expansión del universo durante los últimos 11.000 millones de años, el 80 por ciento del tiempo cósmico. Los resultados contribuyen a discernir entre los distintos modelos teóricos que buscan explicar la

aceleración cósmica y, al mismo tiempo, han aportado indicios para aclarar dos controversias recientes: una relativa a la geometría del universo y otra a su tasa de expansión actual.

Una regla para medir el cosmos

La luz proveniente de galaxias lejanas que recibimos hoy fue emitida hace mucho tiempo. Durante su viaje, el universo se ha estado expandiendo y, con ello, ha provocado que la longitud de onda de esa luz se estire, razón por la que llega a nuestros telescopios con un color más rojizo que el que mostraba en el momento de su emisión. Este desplazamiento al rojo puede medirse en los espectros de las galaxias y nos permite calcular el tamaño relativo del universo en el momento de la emisión con respecto a su tamaño actual. Pero, ¿hace cuánto que se emitió esa luz?

Si contásemos con una medida de la distancia recorrida por la luz, podríamos inferir el tiempo transcurrido desde su emisión. Sin embargo, determinar la distancia a la que se encuentran las galaxias lejanas supone uno de los grandes retos de la cosmología moderna. Durante décadas, los cosmólogos han buscado estructuras con un tamaño conocido y que puedan observarse desde grandes distancias a fin de usarlas como «reglas estándar». En tal caso, dado que conoceríamos su tamaño real, medir el tamaño aparente que presentan desde la Tierra (el ángulo que subtienden en el cielo) permitiría calcular la distancia a la que se encuentran a partir de argumentos geométricos.

Una regla de ese tipo la proporcionan las llamadas oscilaciones acústicas bariónicas. Poco después de la gran explosión, el universo estaba formado por un plasma muy denso y caliente compuesto por radiación (fotones) y partículas de materia ordinaria («bariones», en jerga astronómica). La competición entre la fuerza de la gravedad y la presión del plasma causó que las fluctuaciones en la densidad de materia se propagaran por el universo en forma de ondas, un fenómeno análogo a las ondas sonoras del aire.

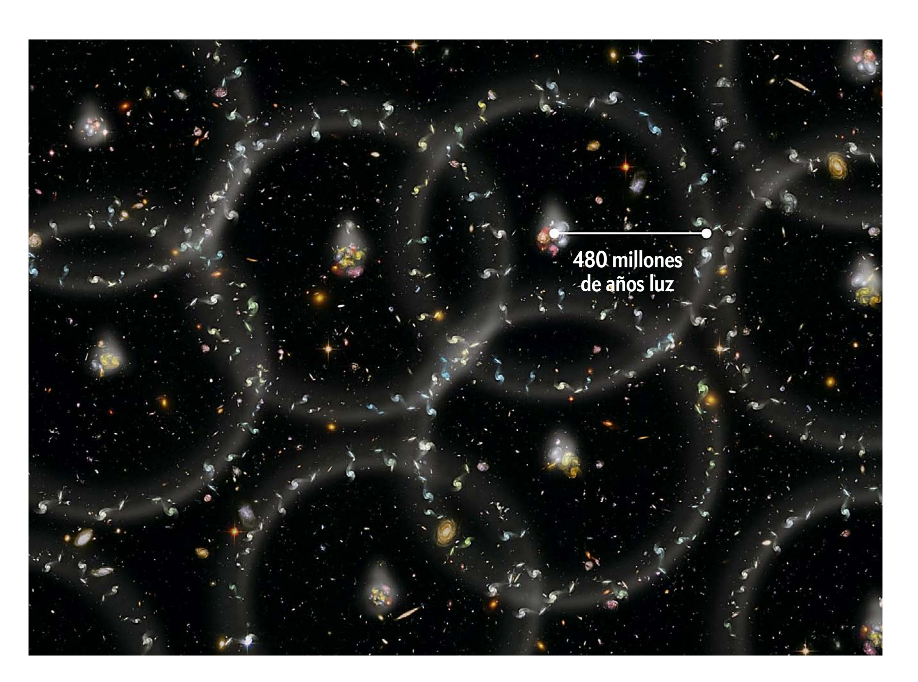
Durante cientos de miles de años, ese plasma se fue enfriando progresivamente hasta alcanzar una temperatura de unos 3000 kelvin. En ese momento, los protones y los electrones comenzaron a unirse para formar átomos neutros de hidrógeno, lo que supuso la emisión de la luz que hoy conforma el fondo cósmico de microondas. Aquel proceso hizo imposible mantener el estado de plasma, por lo que en ese momento las ondas acústicas se «congelaron».

La distancia recorrida hasta entonces por esas ondas, conocida como «horizonte de sonido», dejó una huella de longitud fija en la distribución de materia del universo. Y, a medida que este se expandía, esa huella acabaría reflejándose en la distribución de las galaxias. Es precisamente el tamaño de esta impronta lo que proporciona una «regla universal» para medir la distancia a galaxias lejanas. En el universo actual, dicha regla asciende a 480 millones de años luz. Hoy, dos galaxias cualesquiera tienen una probabilidad ligeramente superior de estar separadas por esa distancia que por otras inmediatamente mayores o menores.

Mapas cósmicos y energía oscura

¿Cómo buscar esa vara de medir cósmica en nuestros mapas de galaxias? En primer lugar, si una muestra de galaxias presenta valores similares del desplazamiento al rojo, podemos deducir que su luz fue emitida en torno a la misma época, por lo que todas ellas se encontrarán a una distancia similar. Por otro lado, cuando analizamos estadísticamente cómo se distribuyen las galaxias en los mapas, vemos que hay una probabilidad mayor de que dos galaxias cualesquiera estén separadas por un cierto ángulo en el cielo, en comparación con otros valores. Este pico en la función de probabilidad se corresponde, precisamente, con el horizonte de sonido de las ondas acústicas, del cual conocemos el tamaño. Al medir dicho pico en la distribución de galaxias y aplicar trigonometría básica, podemos calcular la distancia a la que se encuentra cada conjunto de galaxias.

Para confeccionar los mapas de galaxias y detectar el pico causado por las oscilaciones acústicas bariónicas, necesitamos medir el desplazamiento al rojo de millones de galaxias. Con este objetivo, en 2008 se construyó un instrumento en el telescopio de la Fundación Sloan, en el observatorio astronómico de Apache Point, en Nuevo México, capaz de obtener simultáneamente el espectro de mil galaxias y medir su desplazamiento al rojo con gran precisión. Gracias a ello, el proyecto eBOSS ha construido mapas con más de dos millones de galaxias lejanas y ha medido el pico asociado a las oscilaciones acústicas bariónicas en seis épocas de la evolución del universo. Los datos incluyen la distancia a galaxias que emitieron su luz cuando el universo ob-



ECOS DE UN UNIVERSO NACIENTE: Poco después de la gran explosión, el universo estaba formado por un plasma caliente de partículas por el que se propagaban ondas acústicas. Cuando el estado de plasma desapareció, esas ondas quedaron «congeladas» con un tamaño fijo. Dicho proceso ha dejado una huella en la distribución de galaxias del universo actual: hoy, dos galaxias cualesquiera tienen una probabilidad ligeramente superior de estar separadas por una distancia de 480 millones de años luz (*imagen, recreación artística*) que por otras distancias algo mayores o menores. Esa separación «habitual» entre galaxias proporciona una regla universal de tamaño conocido que permite estimar cuán lejos se hallan las galaxias remotas.

ZOSIA ROSTOMIAN/LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE BERKELEY

servable apenas tenía el 30 por ciento de su tamaño actual.

Los resultados presentados por eBOSS confirman que la expansión del universo se está acelerando. Al combinarlos con las observaciones del fondo cósmico de microondas efectuadas por el satélite Planck, de la Agencia Espacial Europea, encontramos que el modelo que consigue explicar todos los datos de manera coherente es el que postula un universo formado por un 5 por ciento de materia ordinaria, un 26 por ciento de materia oscura y un 69 por ciento de energía oscura.

La misma combinación de datos indica que la densidad de energía oscura parece ser constante en el tiempo. Ello contradice las predicciones de aquellas teorías que postulan una energía oscura variable, y apuntala el modelo más sencillo posible para la energía oscura: aquel en el que esta se corresponde con la constante cosmológica propuesta por Albert Einstein hace un siglo.

Geometría y tasa de expansión

Por último, los resultados de eBOSS han contribuido a dos debates recientes sobre las propiedades del cosmos.

El primero de ellos atañe a la geometría del universo. La teoría de la relatividad general describe el modo en que la materia deforma el espaciotiempo a su alrededor. Cuando eso ocurre, la geometría euclídea tradicional, o geometría «plana» (aquella en la que, por ejemplo, los ángulos de un triángulo siempre suman 180 grados) deja de ser válida. ¿Qué ocurre con la geometría del universo cuando lo analizamos a gran escala?

Hace decenios que los cosmólogos creen que, en cada instante de tiempo, la geometría espacial del universo es plana. En 2019, sin embargo, Eleonora Di Valentino, de la Universidad de Manchester, y otros investigadores sugirieron en *Nature Astronomy* que tal vez vivamos en un universo cerrado, o de curvatura positiva (en dos dimensiones, hablaríamos de una geometría similar a la de una esfera, por oposición a la de un plano). Este trabajo y otros han usado los datos del fondo cósmico de microondas obtenidos por el satélite Planck, y concluyen que el universo en su conjunto es curvo con una probabilidad superior al 95 por ciento.

Sin embargo, tales modelos predicen una expansión del universo que no concuerda con los resultados de eBOSS. Si combinamos los datos de Planck y de eBOSS, obtenemos un resultado diez veces más preciso y compatible con un universo plano.

El segundo debate concierne al ritmo al que se expande el universo actual, el cual viene dado por la cantidad conocida como constante de Hubble (H_0). Por un lado, las observaciones basadas en galaxias cercanas, como la colaboración SH0ES, liderada por el premio nóbel Adam Riess, obtienen para H_0 un valor cercano a los 74,0 ± 2,8 kilómetros por segundo y por megapársec (km/s/Mpc). Por otro, las mediciones del fondo de microondas efectuadas por el satélite Planck arrojan un valor considerablemente menor: 67,4 ± 1,0 km/s/Mpc. (Ambos resultados se dan con un nivel de confianza del 95 por ciento.) Hasta hoy, nadie conoce el origen de esta discrepancia [*véase* «La crisis en torno a la constante de Hubble», por Richard Panek; Investigación y Ciencia, mayo de 2020].

Las mediciones de eBOSS permiten ajustar un modelo para la expansión del universo y extrapolarlo hasta nuestros días, lo que supone una nueva manera de medir H_0. Para asegurar que el resultado sea independiente del de Planck, eBOSS realiza su propia calibración del horizonte de sonido, nuestra regla estándar, usando datos de las abundancias de los elementos químicos creados en la gran explosión, como hidrógeno y helio.

De esta manera, eBOSS ha determinado que, con un nivel de confianza del 95 por ciento, el ritmo de expansión del universo actual es de 67,3 ± 1,9 km/s/Mpc. Es decir, tanto eBOSS como Planck encuentran esencialmente el mismo valor para la constante de Hubble. ¿Hay algún problema entonces con las demás medidas de H_0? ¿O tal vez estamos observando los efectos de un nuevo fenómeno aún sin identificar? De momento, no existe una respuesta satisfactoria para esta pregunta. Cabe esperar que futuras mediciones basadas en métodos alternativos, como ondas gravitacionales o lentes gravitatorias, obtengan la precisión suficiente para contrastarlas con las actuales y puedan arrojar luz sobre este misterio.

La cosmología del futuro

La cosmología actual ha alcanzado un nivel de precisión impensable hace solo unos años. ¿Qué futuro nos deparan estos trabajos?

Tras veinte años de observaciones, el telescopio de la Fundación Sloan se empleará ahora para otros estudios. El relevo en el análisis de la expansión cósmica lo tomará el Instrumento Espectroscópico para la Energía Oscura (DESI, por sus siglas en inglés), en Arizona. Con un nuevo sistema robótico que le permitirá analizar simultáneamente 5000 galaxias, DESI ha empezado hace poco un programa de cinco años para construir un mapa aún más detallado del universo, con catálogos de galaxias hasta diez veces mayores que los confeccionados por eBOSS.

La Agencia Espacial Europea planea para el 2022 el lanzamiento de Euclid, un satélite con un potente telescopio a bordo para estudiar la expansión y la geometría del universo desde el espacio. Tanto DESI como Euclid cuentan con la contribución de distintas instituciones españolas que han colaborado en su diseño y construcción, y que participarán también en el análisis de los datos. Estos experimentos nos permitirán también estudiar otras incógnitas no menos fascinantes, como la medición de la masa de los neutrinos a partir de su impacto en la distribución de materia en el universo.

Andreu Font-Ribera *investiga en el Instituto de Física de Altas Energías de Barcelona,* ***Héctor Gil-Marín*** *en el Instituto de Ciencias del Cosmos de Barcelona, y* ***Santiago Ávila*** *en el Instituto de Física Teórica de Madrid.*

PARA SABER MÁS

Cosmology Results from eBOSS. Página web del proyecto: **sdss.org/science/cosmology-results-from-eboss**

The Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point observatory. Colaboración eBOSS en **arxiv.org/abs/2007.08991,** julio de 2020.

Planck 2018 results VI: Cosmological parameters. Colaboración Planck en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 641, A6, septiembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El Sondeo de la Energía Oscura. Joshua Frieman en *IyC*, enero de 2016.

El rompecabezas de la energía oscura. Adam G. Riess y Mario Livio en *IyC*, mayo de 2016.

Nueva luz sobre el cosmos oscuro. Eusebio Sánchez, Ramon Miquel y Juan García-Bellido en *IyC*, enero de 2018.

La crisis en torno a la constante de Hubble. Richard Panek en *IyC*, mayo de 2020.

por Kanta Subbarao



Kanta Subbarao es directora del Centro Colaborador de la OMS de Referencia e Investigación sobre la Gripe en Melbourne.

Vacunas anti-COVID-19: Incertidumbres y transparencia

La población debe estar informada sobre lo que se sabe y no se sabe de ellas

Como médica investigadora, estoy acostumbrada a tomar decisiones clínicas, científicas y de salud pública en función de los datos. Parte de mi trabajo consiste en asesorar sobre la composición de la vacuna anual de la gripe. En la pandemia del nuevo coronavirus he tenido que adaptarme, como todo el mundo, a la incertidumbre. Todavía quedan dudas por despejar acerca de las vacunas anti-COVID-19: si es más eficaz una que otra, cómo actuarán en las personas con mayor riesgo de padecer una enfermedad grave —que a menudo quedan excluidas o están infrarrepresentadas en los ensayos clínicos—, si evitarán la transmisión del virus o la aparición de cuadros graves, cuánto tiempo durará la inmunidad y qué colectivos podrían ser reacios o negarse a vacunarse por ideología, desconfianza o desinformación.

A pesar de las incertidumbres, los responsables sanitarios tendrán que decidir qué vacunas administrar, a quién, cuándo y con qué frecuencia. Y a los ciudadanos les tocará decidir si se vacunan o no, para lo que deben ser conscientes de que una vacuna eficaz podría no evitar que todos los que la reciban enfermen o infecten a otros. La mejor actitud que pueden adoptar las autoridades es ser muy claras sobre lo que se sabe y lo que no se sabe, involucrar al público en los debates, tomar en serio sus opiniones y generar confianza mediante la transparencia.

Se necesitan varias condiciones para el éxito. La gente debe estar dispuesta a vacunarse: lograr la inmunidad colectiva requerirá tasas de vacunación superiores al 60 o 70 por ciento. Los planes deben tener en cuenta la realidad social. Con las escandalosas desigualdades que ha destapado la pandemia, muchos miembros de las comunidades étnicas y raciales minoritarias no confiarán del todo en sus Gobiernos. Se precisan mensajes adaptados a sus preocupaciones en las redes sociales y otras plataformas. Además, no deben olvidarse las medidas preventivas esenciales: mascarillas, lavado de manos y distanciamiento físico. Todas estas estrategias dependen de que se mantenga la confianza de la población a medida que avance el conocimiento.

Casi todas las vacunas habituales suelen administrarse a los niños o a un grupo concreto de personas. En cambio, las de la COVID-19 deberán administrarse lo más rápido posible a la gran mayoría de la población mundial. Contar con una batería de vacunas será fundamental para disponer de suficientes dosis. Numerosos países poseen planes de contingencia para pandemias de gripe que servirán de guía para la vacunación masiva. Conviene que los responsables sanitarios revisen la experiencia de la pandemia gripal de 2009 y examinen cada detalle del lanzamiento de una vacuna. La variabilidad del número de dosis, calendarios, condiciones de conservación y cadenas de suministro de las diferentes vacunas complicará la logística.



GETTY IMAGES/PORNPAK KHUNATORN/ISTOCK

Se plantearán decisiones difíciles. Cada vacuna se autoriza en función de su comparación con un placebo, no con otras vacunas. Al principio, no dispondremos de datos sobre su distinta eficacia para prevenir la enfermedad o inducir la inmunidad. Los profesionales sanitarios suelen considerarse la categoría de máxima prioridad, porque corren el mayor riesgo de infección y son esenciales para el funcionamiento de la sociedad. En la siguiente categoría se incluyen aquellos con riesgo de sufrir una enfermedad grave y fallecer debido a su edad y afecciones previas. Pero no es probable que los ensayos reflejen los efectos de las vacunas en estas poblaciones. Estas suelen funcionar mejor en adultos jóvenes sanos; por ello, las que se elaboran para enfermedades como la gripe y el herpes zóster se potencian para los ancianos, con una dosis más alta o un adyuvante. Por último, se desconoce la capacidad de las vacunas para reducir la transmisión del virus, por lo que será difícil determinar si los jóvenes sanos vacunados podrán volver al trabajo con total seguridad sin tomar constantes precauciones.

El público debe participar en los debates sobre los riesgos y los beneficios de las vacunas, sobre quién debe vacunarse antes y por qué. Varios grupos de expertos han deliberado y escrito sobre estas cuestiones, pero la gente debe poder valorar sus argumentos y opinar. Una forma de hacerlo es a través de «jurados ciudadanos», grupos representativos de personas que se reúnen para considerar problemas y aportar sugerencias. Así se hizo en Australia ante la amenaza de las pandemias del síndrome respiratorio agudo grave y la gripe aviar.

Es importante mantener la cabeza fría ante las buenas noticias. Se han emprendido ensayos clínicos con diversas vacunas en un tiempo récord y los datos son prometedores. A medida que incorporemos nueva información a la toma de decisiones, tendremos que dar prioridad a la claridad y la transparencia acerca de lo que sabemos y lo que no sabemos.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 586, pág. 475, 2020.
Traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group © 2020




ELECTRÓNICA

LA ESPINTRÓNICA IMITA AL CEREBRO

En términos energéticos, el cerebro es mucho más eficiente que los ordenadores. ¿Cabe inspirarse en él para fabricar mejores dispositivos?

Julie Grollier y Damien Querlioz

LAS UNIONES TÚNEL MAGNÉTICAS permiten diseñar neuronas y sinapsis artificiales que gastan poca energía y podrían reemplazar a los algoritmos de redes neuronales.



Julie Grollier es investigadora de la Unidad Mixta de Física CNRS/Thales, en Palaiseau.

Damien Querlioz investiga en el Centro de Nanociencias y Nanotecnologías de Palaiseau.



LOS ALGORITMOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL HAN EXPERIMENTADO GRANDES avances en los últimos años. Están cada vez más presentes en nuestra vida cotidiana y son capaces de analizar el contenido de textos e imágenes o de reconocer instrucciones de voz, a menudo de manera más eficaz que los seres humanos. Así, en 2017, el programa AlphaGo batió al campeón mundial del juego del go, el chino Ke Jie, una victoria que los expertos no esperaban hasta al menos diez años más tarde.

Sin embargo, para alcanzar tales logros, esos algoritmos consumen grandes cantidades de energía, mucha más de la que precisa nuestro cerebro para abordar tareas equivalentes. Por ejemplo, entrenar los modelos de inteligencia artificial para el tratamiento del lenguaje humano, como BERT (o su versión en español, BETO), requiere una energía de mil kilovatios hora, más o menos lo que gasta el cerebro humano en seis años.

Y eso a pesar de que la inteligencia artificial moderna, basada en algoritmos que implementan redes neuronales «profundas», se inspira en parte en la estructura del cerebro. Entonces, ¿a qué se debe tal diferencia de rendimiento? La respuesta es que los programas de inteligencia artificial de hoy en día se ejecutan en ordenadores clásicos o tarjetas gráficas, cuya arquitectura y principio de cálculo son muy distintos a los del cerebro.

A fin de superar ese desafío energético, numerosos investigadores y empresas desarrollan nuevas estrategias en pos de una electrónica con un funcionamiento realmente calcado al del cerebro. Es el caso de la espintrónica, que se sirve de las propiedades cuánticas de los electrones para crear dispositivos capaces de simular el comportamiento de las neuronas del cerebro y de las sinapsis que las conectan. Aún falta mucho para industrializar una solución completa basada en la espintrónica, pero los primeros resultados son muy prometedores.

CÁLCULO Y MEMORIA SEPARADOS

En los ordenadores actuales, el principal obstáculo para ahorrar energía y aumentar la velocidad es que la memoria que almacena la información está separada físicamente de los procesadores, que es donde se transforman los datos siguiendo las instrucciones del programa. Pero los algoritmos de inteligencia artificial comportan millones o incluso miles de millones de parámetros. Un programa así necesita recabar continuamente datos de la memoria, para sumarlos o multiplicarlos en el procesador y volver a guardarlos en la zona de almacenamiento. Y este flujo constante de información a través de una única vía de comunicación consume muchísima electricidad.

El funcionamiento del cerebro es muy diferente. La memoria está por todas partes: se distribuye y almacena en las sinapsis, las conexiones entre las neuronas que, a su vez, ejecutan las operaciones con los datos. Cada neurona está conectada en promedio a unas diez mil sinapsis, lo que permite realizar cálculos en paralelo. Esa yuxtaposición entre cálculo y memoria, sumada al tratamiento en paralelo, da como resultado una gran eficiencia energética.

La propia naturaleza del cálculo también reporta un ahorro de energía considerable. Nuestros ordenadores manipulan datos muy precisos, codificados en forma de bits de información, y el procesamiento de estos datos responde a operaciones lógicas de un rigor implacable. Esa precisión resulta crucial para numerosas aplicaciones, como enviar un cohete al espacio, pero no es necesaria en muchas otras, como reconocer una cara familiar. E imponer que un circuito electrónico tenga un comportamiento perfecto que no deje lugar a la incertidumbre conlleva un elevado coste energético, pues exige eliminar todos los ruidos parásitos y corregir todos los errores.

El cerebro dispone de una fuente de energía limitada (el aporte calórico diario), así que ha desarrollado una estrategia radicalmente distinta: busca un compromiso entre la fiabilidad en el tratamiento de la información y el gasto energético. Eso lleva a que las sinapsis y las neuronas muestren comportamientos estocásticos: al incorporar un cierto margen de aleatoriedad, no producen siempre el mismo resultado aunque reciban datos similares.

EN SÍNTESIS

Aprovechando el espín de los electrones, es posible diseñar componentes electrónicos con características completamente nuevas.

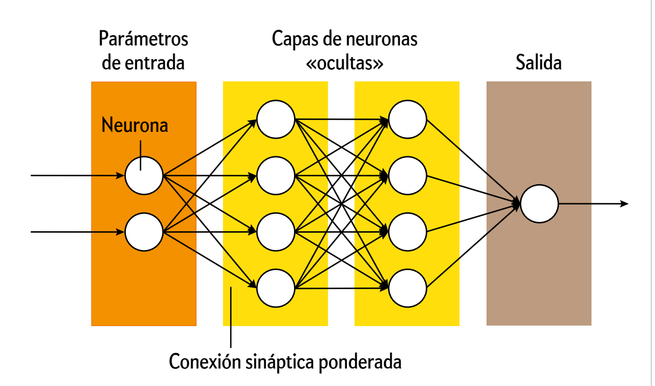
Esa es la idea de la espintrónica, una técnica que permite disponer las unidades de memoria muy cerca de los procesadores, igual que ocurre con las sinapsis y las neuronas del cerebro.

Los primeros prototipos han demostrado que los dispositivos basados en la espintrónica consumen poca energía y ofrecen prestaciones equiparables a las de los algoritmos de redes neuronales.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/MF3D/ISTOCK

Algoritmos de redes neuronales

Las redes neuronales de la inteligencia artificial no son estructuras físicas, sino algoritmos inspirados en el funcionamiento del cerebro que representan unos nodos, las neuronas, conectados entre sí mediante sinapsis. En el caso del aprendizaje profundo, las neuronas se organizan en capas [*véase* «Aprendizaje profundo», por Yoshua Bengio; Investigación y Ciencia, agosto de 2016]. El número de capas y de neuronas por capa depende de la tarea que deba realizar la red: analizar imágenes, textos o sonidos, por ejemplo. La señal de entrada se envía a las neuronas de la primera capa, que transmiten una señal a las de la siguiente, y así sucesivamente.



En cada neurona, las señales que llegan de la capa precedente se combinan en una suma ponderada por ciertos coeficientes asignados a las sinapsis, los cuales definen la «función sináptica». Esta última se determina durante la fase de aprendizaje de la red neuronal, que recibe unos datos de entrada, efectúa un cálculo y compara su solución con la que le hemos proporcionado.

Pensemos en una red de neuronas destinada a reconocer imágenes de gatos. Si la red se equivoca en una determinada fotografía, los coeficientes de las sinapsis se corrigen por medio de la retropropagación, un método que emplea herramientas estadísticas para calcular la variación del error neurona a neurona, desde la última capa a la primera. Tras un cierto número de iteraciones, la función sináptica queda configurada de modo que la red neuronal reconoce las imágenes de gatos con una tasa de error muy baja.

Como contrapartida, el cerebro adopta diversas tácticas para garantizar la fiabilidad. Por ejemplo, como cada neurona por separado no es muy fiable, a veces varias de estas células se encargan de procesar la misma señal, y a partir del conjunto de sus respuestas se deduce un resultado coherente y estable. A fin de cuentas, el coste energético de la redundancia es menor que el de un sistema demasiado rígido que corrige los errores de manera sistemática.

Además, las señales almacenadas en las sinapsis y procesadas por las neuronas no son un código binario de ceros y unos, como en la electrónica actual, sino que presentan una amplia gama de valores distintos y muy próximos: eso hace que contengan mucha más información, pero también que sean más sensibles a las perturbaciones, es decir, al «ruido». Por último, al contrario de lo que sucede en un procesador (donde cada elemento opera al ritmo de un único reloj, lo que asegura un funcionamiento coherente pero limita la velocidad del tratamiento de la información), el cerebro trabaja de manera asíncrona: cada neurona emite señales eléctricas a su propio ritmo y las usa para comunicarse de manera eficaz con otras neuronas, a veces situadas en zonas distintas del cerebro.

EL CEREBRO, FUENTE DE INSPIRACIÓN

Estas particularidades contribuyen a la mayor eficiencia energética del cerebro. ¿Podríamos inspirarnos en él para construir componentes electrónicos o chips capaces de tratar los datos usando muy poca energía? Si las neuronas y las sinapsis electrónicas estuvieran muy próximas, con objeto de acercar la memoria y los cálculos, sería posible reproducir una arquitectura equivalente a la de nuestra red de neuronas. La idea no es nueva: a finales de la década de 1980, Carver Mead, investigador del Instituto de Tecnología de California y uno de los padres fundadores de la microelectrónica moderna, inventó el concepto de los circuitos neuromórficos, cuyo objetivo es imitar la arquitectura neurobiológica del cerebro. Sin embargo, el planteamiento original de Mead se abandonó hace tiempo, debido a los numerosos obstáculos técnicos [*véase* «Cerebros de silicio», por M. Mitchell Waldrop; Mente y Cerebro n.º 70, 2015].

El primer escollo tiene que ver con la memoria: las técnicas de la electrónica actual no permiten integrar grandes cantidades de memoria muy cerca de donde se efectúan los cálculos. De hecho, los únicos circuitos de memoria que se pueden integrar en los procesadores (la memoria estática de acceso aleatorio, o SRAM) resultan muy caros, puesto que ocupan una superficie extensa y valiosa del procesador. Esa es la razón por la que los procesadores solo poseen una pequeña capacidad de almacenamiento, mientras la mayor parte de la memoria se distribuye fuera de las zonas de cálculo. No obstante, se están estudiando varios métodos para acercar la memoria a los procesadores. Uno de ellos, la electrónica del espín, o espintrónica, ha hecho progresos espectaculares en estos últimos años.

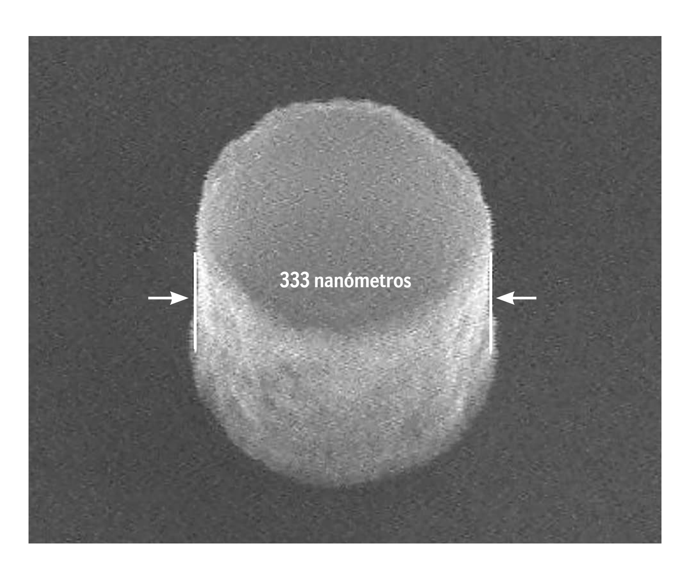
Dicha técnica no emplea solo la carga eléctrica de los electrones, sino también su espín, una propiedad puramente cuántica asimilable a un momento angular y que se representa mediante una pequeña flecha orientada. Como el espín es responsable del momento magnético intrínseco del electrón, si la mayoría de los electrones tienen el espín apuntando en una misma dirección, el material estará imantado. La espintrónica aprovecha las interacciones entre los espines de los electrones que conforman la corriente eléctrica y los materiales magnéticos.

En concreto, los componentes básicos de la espintrónica son unos diminutos cilindros de una decena de nanómetros de diámetro que constituyen uniones túnel magnéticas. Tales uniones están formadas por dos capas de materiales magnéticos (nanoimanes) separadas por una barrera aislante. Cuando los dos nanoimanes están orientados en el mismo sentido, la corriente eléctrica puede atravesar fácilmente la capa aislante de la unión (por efecto túnel, un fenómeno cuántico): la resistencia es baja. En cambio, si las orientaciones son opuestas, la resistencia es elevada y la corriente fluye con dificultad.

Si asignamos los valores 0 y 1 a esas dos posibles configuraciones, podemos almacenar la información en formato binario. Las memorias así construidas se denominan memorias magnetorresistivas de acceso aleatorio (MRAM) y comenzaron a desarrollarse a mediados de la década de 1980. Sin embargo, para cambiar el estado de un bit había que aplicar un campo magnético externo que inviertiese la orientación de uno de los nanoimanes, y eso se interponía en la miniaturización de los componentes.

En 1996, John Slonczewski, investigador de IBM, y Luc Berger, de la Universidad Carnegie-Mellon, propusieron por separado una mejora sustancial de estos dispositivos, al poner de manifiesto un nuevo efecto: la transferencia de espín. Cuando los electrones de la corriente eléctrica atraviesan un nanoimán de la unión, su espín interacciona con el de los electrones de esa capa, y eso hace que el espín de los electrones de la corriente se polarice y se alinee con la imantación de la capa. En una unión, la imantación de uno de los dos nanoimanes se mantiene fija, mientras que la otra se puede modificar. Cuando una corriente polarizada atraviesa esta última capa, reorienta la imantación, lo cual permite escribir un bit 0 o un bit 1 (según el sentido en que circule la corriente) sin necesidad de recurrir a un campo magnético externo. Este hallazgo abrió la puerta al diseño de MRAM integradas.

Desde entonces, varios fabricantes de sistemas microelectrónicos producen dispositivos de memoria que emplean la transferencia de espín y que llegan a integrar 1000 millones de uniones en un chip de silicio. Tales memorias ya han encontrado aplicaciones en la electrónica habitual, pues aúnan las cualidades de las dos grandes familias de memorias informáticas: la velocidad de lectura y escritura de las memorias RAM, y la capacidad para conservar la información durante mucho tiempo de las memorias de almacenamiento.



UNIÓN TÚNEL MAGNÉTICA vista a través de un microscópico electrónico de barrido. Estas uniones se fabrican en varias etapas. Primero se hacen crecer las capas de material, una tras otra, mediante pulverización catódica en una cámara de vacío. Para obtener uniones de un diámetro inferior a la micra, se recubre el material con una resina electrosensible y con una máscara que tiene dibujada la forma de la unión. Se somete el conjunto a una fuente de electrones (litografía) y la resina expuesta se conserva. Por último, las partes del material que no están protegidas por la resina se corroen y se retiran, dejando solo la forma de la unión.

Con ello nos acercamos a la idea de los chips neuromórficos, ya que resulta sencillo insertar uniones túnel magnéticas en el seno de los circuitos de silicio que realizan los cálculos, en los lugares más útiles para almacenar datos en forma de bits. Al igual que en el cerebro, donde las sinapsis están en contacto con las neuronas, esas sinapsis artificiales estarán muy cerca del núcleo de cálculo de silicio. Si queremos implementar un algoritmo de redes neuronales en este dispositivo, bastaría con configurar todas las sinapsis con los valores adecuados para la tarea concreta del programa, por ejemplo, identificar elementos de imágenes o sonidos.

Al reducir drásticamente los intercambios de datos entre la memoria externa y el procesador, es factible ejecutar los algoritmos de inteligencia artificial gastando menos energía. Esta fórmula ya se está ensayando en laboratorios académicos e industriales, pero no es del todo satisfactoria: hay que conocer por adelantado los valores que deben memorizar las sinapsis para llevar a cabo una tarea. El dispositivo carece de la capacidad de adaptación de un cerebro real, cuando lo ideal sería un circuito que pudiera aprender a realizar nuevas operaciones.

INICIALIZAR LAS SINAPSIS

Los algoritmos de redes neuronales a menudo incluyen una primera fase de «aprendizaje», donde la red va ajustando los valores de las sinapsis a fin de ejecutar cada vez mejor la tarea asignada. Por desgracia, para identificar esos valores, el algoritmo se basa en la retropropagación, un método matemático complejo que requiere numerosos cálculos muy precisos y que, en consecuencia, gasta mucha energía. Es un proceso que se adapta bien a los ordenadores, pero no necesariamente a un sistema inspirado en el cerebro y que emplea cálculos menos precisos.

Siguiendo la lógica de los sistemas neuromórficos, en vez de reproducir un método que consume tanta energía, sería más sensato inspirarse de nuevo en la manera en que aprende el cerebro. En particular, las sinapsis biológicas no solo actúan a modo de memoria, sino que también ocupan un lugar central en el mecanismo de aprendizaje. Y es que las sinapsis son plásticas: ajustan su actividad según la cantidad de información que reciben. Por ejemplo, si dos neuronas conectadas por una sinapsis se encuentran activas al mismo tiempo, esa sinapsis se ve reforzada. Pero este refuerzo nunca es completo, ya que entonces cada nueva señal eliminaría, en cierto modo, la sutil configuración adquirida por la sinapsis en el curso de toda su experiencia previa.

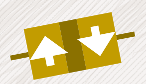
Trasladar ese principio a los dispositivos espintrónicos supondría modificar el valor de las sinapsis artificiales en función de la señal que reciban. Y, en efecto, es posible reproducir una cierta plasticidad en estos sistemas. Cuando se aplica un voltaje a una unión túnel magnética, la imantación de uno de sus nanoimanes comienza a bascular debido al efecto de transferencia de espín. Si el voltaje es lo bastante alto y se aplica durante un tiempo suficiente, eso conlleva la inversión de la imantación del nanoimán, y por tanto, del valor almacenado por la unión túnel magnética. Sin embargo, no siempre es posible predecir esa inversión: si el voltaje no se aplica durante el tiempo suficiente, a veces la imantación se invierte y a veces no. Cuanto más alto sea el voltaje aplicado a la unión, mayor es la probabilidad de que cambie la imantación, pero sin llegar nunca al 100 por cien.

CAPACIDAD DE APRENDIZAJE

En una memoria habitual, se debe evitar a toda costa ese comportamiento incierto. Pero, en un sistema neuromórfico, se ob-

Acercar la memoria al procesador

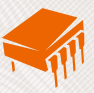
En los ordenadores habituales, los datos se almacenan en una memoria física separada del procesador donde se ejecutan los cálculos. Esta «arquitectura de Von Neumann» es fácil de implementar, pero consume mucha energía y su velocidad es limitada. Para superar estos inconvenientes, en los últimos años varias técnicas han intentado remedar algunas de las características del cerebro, donde las unidades de memoria y las de procesamiento (las sinapsis y las neuronas) se encuentran en contacto.



ESPINTRÓNICA

Esta técnica se basa en las uniones túnel magnéticas. La resistencia de una unión, que depende de cómo estén orientadas las imantaciones de sus dos capas magnéticas, codifica los bits (ceros y unos). Es posible configurar estos componentes para que actúen a modo de sinapsis o neuronas artificiales.

- (+) Física especialmente rica y bien entendida
- (−) Fabricación compleja



TRANSISTORES

Es factible fabricar neuronas y sinapsis artificiales con transistores de silicio, pero se necesitan cientos de ellos para implementar una única neurona. Esta idea se ha llevado a la práctica en los chips TrueNorth, de IBM, y Loihi, de Intel.

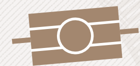
- (+) Realizable hoy en día
- (−) Memorias muy costosas



MEMRISTORES

Estos componentes electrónicos, hechos de materiales como el dióxido de titanio, poseen una resistencia que depende de la corriente que circula por ellos. Su estado es una función del historial de corrientes aplicadas previamente. Así pues, estas memorias artificiales exhiben una cierta plasticidad sináptica.

- (+) Fabricación sencilla
- (+) Componentes baratos
- (−) Baja fiabilidad



MEMORIAS DE CAMBIO DE FASE

Estos dispositivos contienen materiales que pasan de una fase cristalina a otra amorfa por efecto del calor, como los vidrios de calcogenuro. La resistencia eléctrica es mayor en las fases amorfas que en las cristalinas, lo cual permite codificar los bits 0 y 1.

- (+) Tecnología desarrollada
- (−) Alto consumo energético



ÓPTICA

En un ordenador óptico, los fotones emitidos por láseres desempeñan el papel de los electrones. La señal luminosa se procesa directamente con componentes ópticos más rápidos que los transistores eléctricos. También es posible diseñar dispositivos de memoria con componentes ópticos.

- (+) Cálculos muy rápidos
- (−) Implementación compleja (es difícil miniaturizar los componentes)
- (−) Alto consumo energético

GETTY IMAGES/JOLYGON/ISTOCK

tienen sinapsis que, bajo la acción de las señales que reciben, van transformando la función de la red neuronal de la que forman parte y adaptan la respuesta del sistema a la nueva tarea sin necesidad de recurrir a métodos tan costosos como la retropropagación.

En 2015, demostramos junto a nuestros colaboradores que un sistema equipado con memorias espintrónicas plásticas podía aprender a contar los vehículos de una autopista (con una precisión del 95 por ciento) o a reconocer números manuscritos igual que un algoritmo de inteligencia artificial. En estas tareas relativamente simples, las prestaciones se acercan a las de las técnicas tradicionales de aprendizaje de redes neuronales (que, sin embargo, requieren más sinapsis y consumen más energía). Por el contrario, para tareas más complejas (como retar a un jugador profesional de go), las técnicas de aprendizaje inspiradas en la biología aún están lejos de poder competir con las más habituales.

Aunque seamos capaces de construir sinapsis artificiales que almacenan información y de modular su respuesta para simular la plasticidad sináptica y el fenómeno del aprendizaje, un sistema neuromórfico completo también debe incluir neuronas para realizar los cálculos. El cerebro humano contiene cerca de cien 100.000 millones de neuronas, mientras que los algoritmos de inteligencia artificial llegan a simular decenas de millones de neuronas. ¿Es factible fabricar neuronas con las técnicas actuales de transistores de silicio? Para empezar, si queremos alojar tantos componentes en un chip del tamaño de un sello, cada neurona debería tener unas dimensiones mucho menores que una micra. Y eso resulta imposible, ya que para elaborar una sola neurona mediante este método se requieren cientos de transistores.

La espintrónica ha logrado imitar cientos de neuronas con una sola unión túnel magnética, gracias a la multiplexación

Por ejemplo, el chip TrueNorth, concebido por IBM en 2014, constituye una demostración impresionante de electrónica neuromórfica que no hace uso de la espintrónica [*véase* «Más allá de la ley de Moore», por John Pavlus; Investigación y Ciencia, julio de 2015]. Este sistema incluye 5000 millones de transistores (un número considerable), lo que le permite implementar un millón de neuronas y cientos de millones de sinapsis. Al acercar el centro de cálculo y la memoria, el chip consume una potencia varios órdenes de magnitud inferior a la de un circuito usual, de acuerdo con IBM.

En realidad, la arquitectura del chip TrueNorth no contiene un millón de neuronas: este tipo de neuronas artificiales ocupan una superficie demasiado grande como para alojar tantas en un chip. Ahora bien, el chip es tan rápido que un solo circuito numérico puede implementar varias neuronas, efectuando sucesivamente los cálculos asociados a cada una de ellas, lo cual supone una pequeña (pero muy práctica) desviación respecto a la idea original del neuromorfismo. En 2017, Intel desarrolló un chip análogo, aunque más modesto: Loihi, que implementa unas 130.000 neuronas. Pero estos dispositivos son voluminosos y parece difícil rivalizar con el cerebro humano siguiendo esta estrategia.

La espintrónica representa otra vía para conseguirlo, ya que las uniones túnel magnéticas pueden imitar las principales funciones de las neuronas del cerebro. En particular, estas se comunican mediante impulsos eléctricos. Todos esos impulsos son idénticos, pero su número depende de la estimulación de la neurona: si una neurona recibe muchos impulsos en poco tiempo, también los generará con una frecuencia elevada. Y si se estimula con pocos impulsos, emitirá un número reducido de ellos.

Con la electrónica tradicional, es difícil obtener neuronas de tamaño nanométrico, puesto que producir impulsos a un ritmo determinado requiere crear bucles de retroalimentación en el circuito electrónico, lo cual ocupa espacio. En cambio, es posible fabricar uniones túnel magnéticas que reproduzcan este comportamiento.

Una solución es hacer que las señales de entrada tomen la forma de corrientes eléctricas que se suman (igual que en una neurona biológica) antes de inyectarlas en la unión. A continuación, se eligen las características del dispositivo de manera que el espín transferido por los electrones de la corriente entrante no produzca una reorientación completa de la imantación del nanoimán, sino que la haga oscilar y rotar de manera permanente, como una brújula cuya aguja pivotara sobre sí misma. Como la orientación relativa de las dos imantaciones (la fija y la que está girando) cambia periódicamente, la resistencia eléctrica de la unión se ve afectada (un efecto que se conoce como magnetorresistencia) y se traduce en una señal eléctrica periódica. Cuanto más intensa sea la corriente de entrada, mayor será la velocidad de rotación y la frecuencia de los impulsos generados. Obtenemos así un comportamiento muy parecido al de una neurona. Por otro lado, se trata de un fenómeno que ocurre a temperatura ambiente y es muy estable para dispositivos nanométricos, de modo que puede implementarse en un dispositivo real.

RECONOCIMIENTO DE CIFRAS CASI INFALIBLE

En 2017, conseguimos demostrar experimentalmente que una unión túnel magnética podía imitar una neurona. Y fuimos más allá: empleamos una única unión para emular una red de 400 neuronas gracias a la multiplexación temporal, una estrategia donde la unión va realizando por turnos la tarea de cada neurona. Luego usamos esa red de neuronas espintrónicas para reconocer cifras pronunciadas por diversas personas.

A tal fin, convertimos las señales de audio que queríamos identificar en una corriente eléctrica inyectada a través de la unión túnel magnética. Dicha corriente, que corresponde a las cifras pronunciadas mil veces más rápido (para que la frecuencia se sitúe en el intervalo en que opera el dispositivo), hace que rote la imantación de uno de los nanoimanes de la unión. Por efecto de la magnetorresistencia, la neurona convierte las modulaciones de la corriente en una variación del voltaje entre sus terminales.

Registramos esas variaciones de voltaje producidas por las neuronas espintrónicas y las transmitimos a un ordenador, que simuló la red de neuronas con sus funciones sinápticas. Entonces configuramos estas últimas, mediante una fase de aprendizaje, para reconocer los números pronunciados. Al final, la red era capaz de identificar las cifras con una tasa de acierto del 99,6 por ciento, una eficacia excepcional. Este experimento demostró la capacidad de las uniones túnel magnéticas para imitar las neuronas de manera fiable.

Los trabajos en el campo de la espintrónica con vistas a obtener sistemas neuromórficos son prometedores. Nuestro reto

Manipular el espín

El funcionamiento de los dispositivos electrónicos actuales se basa en la manipulación de la carga eléctrica del electrón. La electrónica del espín, o espintrónica, emplea además otra propiedad cuántica de los electrones: el espín, que corresponde a un momento angular intrínseco de la partícula. Las interacciones entre el espín y ciertos materiales magnéticos permiten diseñar componentes con comportamientos muy ricos.

En un material magnético como el hierro o el cobalto, los espines de los electrones apuntan en un mismo sentido, lo que confiere al material su imantación. Cuando una corriente eléctrica atraviesa uno de esos materiales, los espines de los electrones que conforman la corriente se alinean con la imantación. Este efecto da lugar a dos fenómenos fundamentales de la espintrónica.

El primero es la magnetorresistencia observada en las uniones túnel magnéticas. Estos componentes constan de dos capas imantadas separadas por un aislante. Los materiales empleados dependen de las propiedades que uno desee conferir a la unión. El aislante suele ser un óxido metálico de uno o dos nanómetros de espesor, y la imantación de una de las capas magnéticas es fija, mientras que la otra se puede reorientar.

En 1975, Michel Jullière, del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Rennes, fue el primero en demostrar la magnetorresistencia de efecto túnel. Cuando una corriente eléctrica atraviesa una unión túnel magnética, traspasa la capa aislante gracias al efecto túnel, un fenómeno cuántico. La corriente pasa más fácilmente si las imantaciones de las dos capas magnéticas apuntan en el mismo sentido, y con mayor dificultad si están orientadas en sentidos opuestos.

Así pues, midiendo la resistencia eléctrica (baja o alta) de una unión túnel magnética, podemos deducir la orientación relativa de las imantaciones y asociar un 0 a las configuraciones paralelas y un 1 a las antiparalelas. De este modo, las uniones túnel magnéticas sirven para construir sistemas de memoria donde almacenar bits de información. Se ha generado una importante actividad industrial en torno a las memorias basadas en este principio, denominadas MRAM (memorias magnetorresistivas de acceso aleatorio).

El descubrimiento en 1988 de un efecto análogo en los sistemas metálicos con varias capas, la magnetorresistencia gigante, contribuyó de manera decisiva al desarrollo de la espintrónica y les valió el premio Nobel de física de 2007 a Albert Fert, de la Universidad de París-Saclay, y Peter Grünberg, de la Universidad de Colonia. Esta técnica y la magnetorresistencia túnel se utilizan en las cabezas lectoras de los discos duros modernos.

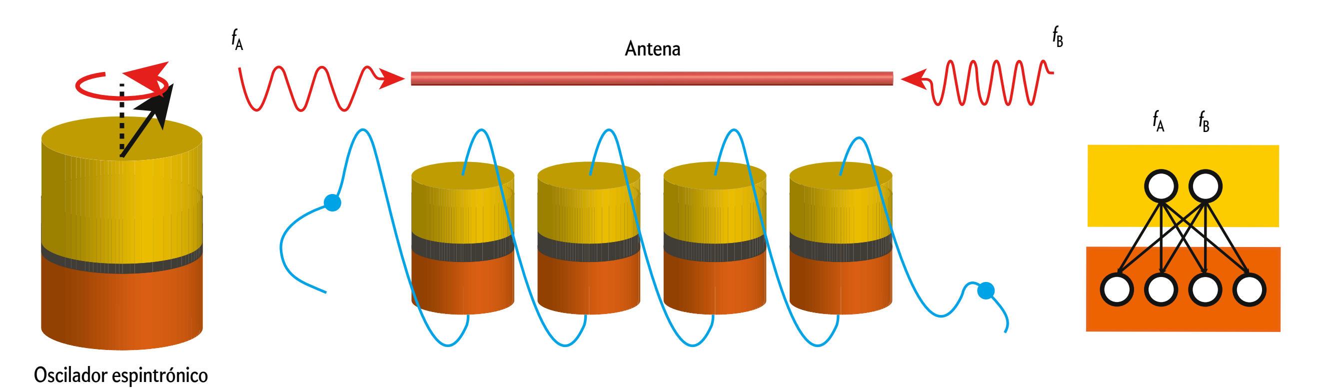
El hecho de disponer de una capa con imantación «móvil» permite reorientar esta última para que la unión represente un bit (un 0 o un 1). Para escribir este bit, al principio se empleaba un campo magnético externo, pero con este método no se puede reducir el tamaño del sistema tanto como requeriría su integración a escala nanométrica.

En 1996, John Slonczewski, investigador de IBM, y Luc Berger, de la Universidad Carnegie-Mellon, pusieron de manifiesto el segundo fenómeno crucial de la espintrónica: la transferencia de espín. Cuando una corriente eléctrica suficientemente intensa atraviesa una unión túnel magnética, puede hacer que la imantación de la capa de imantación móvil bascule hasta alcanzar una configuración paralela o antiparalela.

Para escribir un bit 0, la corriente atraviesa la capa de imantación fija y se polariza: los espines de los electrones de la corriente, que al principio no tenían ninguna orientación determinada, se alinean con la imantación de la capa. Cuando los electrones llegan a la segunda capa, interaccionan con los electrones del material y les transfieren su polarización, de manera que la imantación de esta capa se vuelve gradualmente paralela a la de la otra.

Siendo más precisos, en cada interfase (entre una capa magnética y el aislante), parte de los electrones se reflejan y parte se transmiten. Para escribir un bit 1, la corriente entra por la capa de imantación orientable y se polariza según esa imantación. Pero los electrones que se reflejan en la capa de imantación fija tienen una polarización un poco más antiparalela y transfieren esa orientación a la capa de imantación móvil. Como resultado, se obtiene una configuración antiparalela, correspondiente a un bit 1.

Desde 2008, numerosas industrias emplean las uniones túnel magnéticas de transferencia de espín para diseñar dispositivos de memoria de altas prestaciones.



LAS UNIONES TÚNEL MAGNÉTICAS también pueden actuar como neuronas que procesan la información, cuando la corriente que atraviesa la unión hace que la imantación de la capa superior gire de manera continua (*izquierda*). Entonces la unión emite impulsos, igual que una neurona biológica, y actúa como un emisor-receptor de ondas de radio. En un experimento, se asociaron cuatro neuronas artificiales que sincronizaban sus señales por medio de una antena (*centro*). Esa red de neuronas (*derecha*) era capaz de reconocer vocales pronunciadas en voz alta, después de que los investigadores redujesen la señal a dos frecuencias características, f_A y f_B.

es implementar redes neuronales completas, formadas por millones de uniones túnel magnéticas que desempeñen el papel de neuronas y sinapsis. Como hemos visto, la industria ya sabe integrar miles de millones de uniones en un chip y conectarlas a circuitos electrónicos clásicos para fabricar memorias, lo que constituye una base sólida de la que partir.

Sin embargo, la espintrónica aún no ha acabado de sorprendernos. Las uniones túnel magnéticas podrían ser capaces de imitar otras propiedades del cerebro, como la sincronización de neuronas distantes. En efecto, los impulsos armonizan la respuesta de neuronas cerebrales que pueden estar muy alejadas, haciendo que dicha respuesta se produzca al mismo tiempo. Esta sincronización presenta numerosas ventajas. Las neuronas que emiten impulsos a la vez tendrán un mayor peso en el tratamiento de la señal. Si están conectadas a una misma neurona, esta recibirá muchos impulsos en un breve intervalo de tiempo y podrá transmitirlos de manera muy eficiente. Este fenómeno permite que se coordinen conjuntos enteros de neuronas, hasta el punto de crear potentes ondas cerebrales que modifican el comportamiento de las neuronas de otras áreas del cerebro, en ocasiones distantes.

EMISORES Y RECEPTORES DIMINUTOS

Dado que las uniones túnel magnéticas funcionan muy deprisa, producen pulsos electromagnéticos a una frecuencia de hasta cientos de megahercios, y el tratamiento de la información es millones de veces más rápido que en el cerebro. Otra consecuencia es que estos dispositivos se comportan como nanoemisores de radio. Además, las uniones son muy sensibles a las ondas electromagnéticas ambientales (las cuales pueden modificar la generación de impulsos), así que también son muy buenos receptores de radio. Ajustando correctamente las características de un conjunto de uniones, es posible sincronizarlas gracias a las señales que emiten y reciben, igual que si fueran neuronas biológicas.

Inducir este comportamiento sincronizado en redes de neuronas artificiales constituye una vía apasionante para coordinar física y eficazmente redes neuronales especializadas en diferentes tareas. Desde esta perspectiva, en 2018, estudiamos con nuestros colaboradores un sistema de cuatro uniones túnel magnéticas cuyo objetivo era reconocer vocales pronunciadas en voz alta (*véase la figura superior*). Redujimos la señal de voz a dos frecuencias (mediante análisis de Fourier) y la aceleramos 100.000 veces antes de que una antena la emitiese a los cuatro nanoosciladores. Y constatamos que la capacidad de las uniones para coordinar sus ritmos se tradujo en mejores resultados al clasificar las señales de voz.

Nuestro siguiente objetivo es elaborar redes cuyas neuronas se comuniquen por medio de las ondas electromagnéticas que emiten y reciben las uniones. Es una línea de investigación prometedora para interconectar las neuronas en una red densa, una condición indispensable para acometer tareas más complejas. En última instancia, un sistema completo podría asociar estas uniones que actúan a modo de neuronas a sinapsis artificiales construidas con MRAM, lo que le conferiría capacidad de aprendizaje.

¿Qué podrían llegar a hacer tales sistemas? Nuestra meta no es rivalizar con la inteligencia humana: no entendemos suficientemente bien el cerebro para lograr algo así. Lo que pretendemos es obtener una inteligencia artificial que consuma menos electricidad y sea más rápida que las actuales. Eso permitiría reducir el enorme gasto energético de los centros de cálculo que traducen textos o interpretan lo que les decimos a nuestros altavoces inteligentes, y hasta incorporar esos dispositivos a los teléfonos móviles o a los vehículos autónomos para que nos asistan en nuestro día a día. IyC

PARA SABER MÁS

Spintronic devices as key elements for energy-efficient neuroinspired architectures. Nicolas Locatelli et al. en *Proceedings of the 2015 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*, págs. 994-999, 2015.
Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators. Jacob Torrejon et al. en *Nature*, vol. 547, págs. 428-431, julio de 2017.
Vowel recognition with four coupled spin-torque nano-oscillators. Miguel Romera et al. en *Nature*, vol. 563, págs. 230-234, noviembre de 2018.
Neuromorphic spintronics. Julie Grollier et al. en *Nature Electronics*, vol. 3, págs. 360-370, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Uniones túnel magnéticas. José María De Teresa en *IyC*, abril de 2001.
Espintrónica. David D. Awschalom, Michael E. Flatté y Nitin Samarth en *IyC*, agosto de 2002.
La edad de diamante de la espintrónica. David D. Awschalom, Ryan Epstein y Ronald Hanson en *IyC*, diciembre de 2007.
Memorias del futuro. Luca Perniola en *IyC*, enero de 2014.

EVOLUCIÓN

La diversificación de las aves

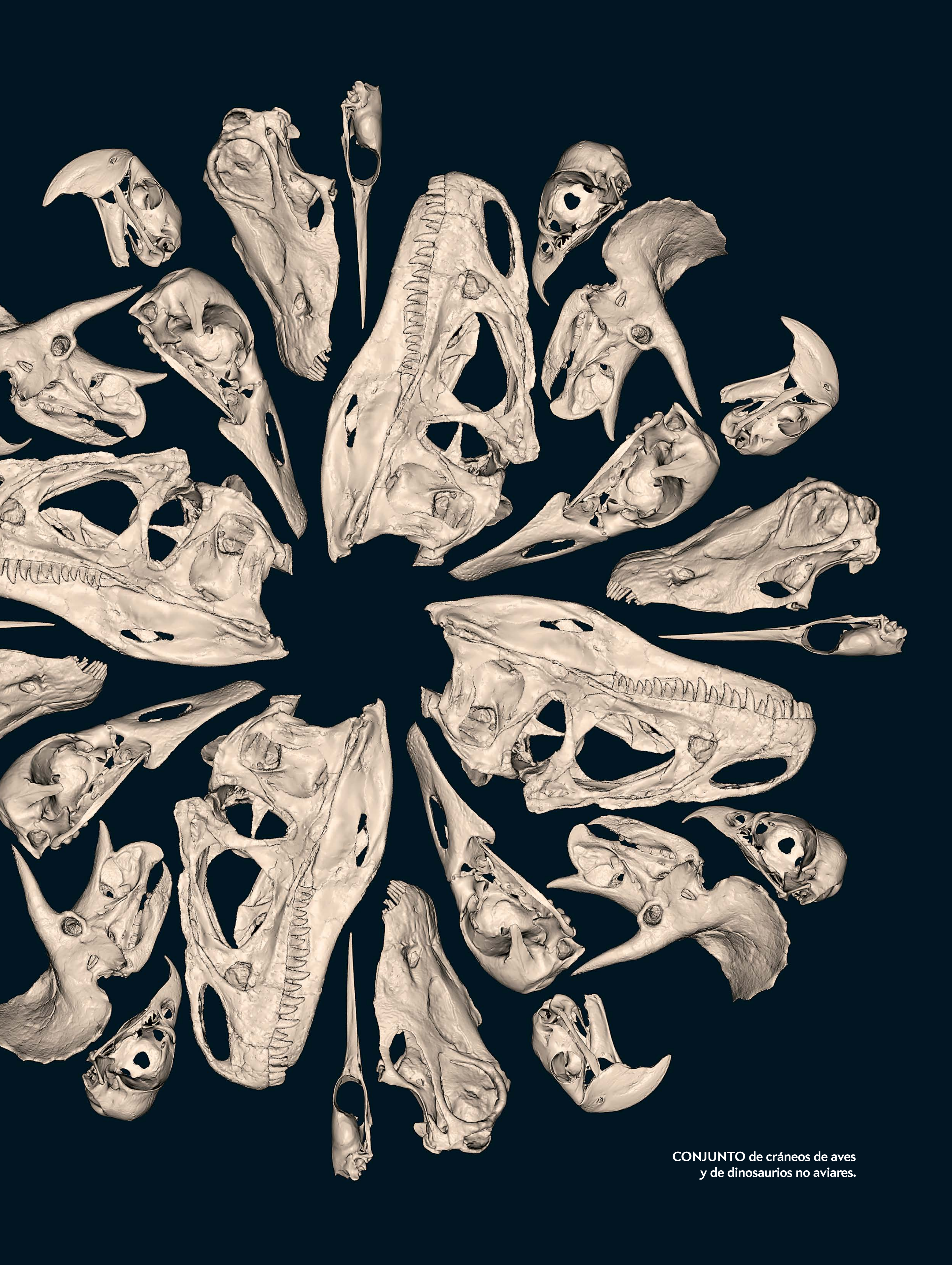
La diversidad de las aves modernas raya lo increíble. Un nuevo estudio matiza cómo alcanzaron supuestamente ese gran éxito evolutivo

Kate Wong



RYAN FELICE

El pasado mayo, cuando quedó claro que permanecería recluida una larga temporada en casa por culpa de la pandemia, me inicié en una afición que no había despertado mi interés hasta entonces: la observación de aves. Limpié y llené de semillas el comedero para pájaros del jardín, que tenía descuidado desde hacía tiempo, desempolvé los prismáticos que guardaba en el sótano y comencé a tomar el café cada mañana al aire libre. Poco a poco progresé en el reconocimiento de los visitantes, prestando atención al tamaño, el color del plumaje, la forma del pico o el canto. Llegué a anotar hasta 39 especies en los límites de mi jardín, en las afueras de la ciudad. Aquellas horas de observación —en las que contemplé cómo los jilgueros se congregaban en el comedero, los picamaderos tamborileaban en los troncos, los pavos desfilaban gallardos por el césped



CONJUNTO de cráneos de aves y de dinosaurios no aviares.



Kate Wong es redactora de evolución y ecología para *Scientific American.*

y los colibríes gorgirrubíes zumbaban por encima de sus flores favoritas, mientras los busardos hombrorrojos sobrevolaban en círculos en lo alto— me ofrecieron una nueva perspectiva sobre su diversidad. Y aquella era solo una brizna de su riqueza. Con más de 10.000 especies vivientes, son el grupo de vertebrados terrestres más diverso del planeta. ¿Cómo han alcanzado esa diversificación espectacular?

Las aves son el último linaje superviviente de los dinosaurios. Surgieron en el período Jurásico, hace entre 200 y 150 millones de años, de los terópodos, un grupo de carnívoros bípedos entre los que destacan el colosal *Tyrannosaurus rex* y el grácil *Velociraptor*. Durante decenas de millones de años las aves evolucionaron en paralelo con otros dinosaurios, diversificándose en seres voladores emplumados, de crecimiento rápido y talla pequeña, junto con algunas formas no voladoras de gran peso. Un grupo, el de las neornitinas, o «aves nuevas», que se distinguen por la fusión del tarso y del metatarso y por ciertos rasgos del esqueleto alar, acabarían dando lugar a las aves modernas.

Los científicos han tendido a ver la moderna diversidad aviar como el resultado de una explosión de actividad evolutiva que tuvo lugar desde el fatídico día en que un asteroide de 10 kilómetros de diámetro impactó contra la Tierra, hace 66 millones de años, aniquilando el 75 por ciento de las especies de flora y fauna, entre ellas los dinosaurios no aviares y la mayoría de los grupos de aves contemporáneas. La causa exacta de por qué solo sobrevivió el linaje de las neornitinas a este apocalipsis se ignora, pero el reciente descubrimiento de un fósil de 66,7 millones de antigüedad en Bélgica, *Asteriornis,* pariente de las anátidas y las gallináceas actuales, sugiere que el tamaño reducido y el hecho de vivir en entornos costeros pudo ayudar. En cualquier caso, la idea era que, a raíz de la extinción masiva, las neornitinas dispusieron de lugares que colonizar casi por doquier. Sin la competencia de los demás dinosaurios (por no citar a un nutrido número de otros vertebrados que también perecieron, como los pterosaurios, los reptiles voladores que habían dominado el cielo), las aves se diversificaron repentinamente en multitud de formas hasta ocupar los numerosos nichos ecológicos vacantes.

Ahora, un nuevo análisis pone en duda que tan extraordinaria diversidad pudiera surgir de ese modo. Gracias al estudio de cientos de cráneos de aves y dinosaurios, Ryan Felice, del Colegio Universitario de Londres; Anjali Goswami, del Museo de Historia Natural de Londres, y sus colaboradores han descubierto que, en el período posterior a la extinción masiva, el ritmo de la evolución de las aves en realidad se redujo respecto al de los dinosaurios que las precedieron, en lugar de acelerarse como se suponía. Publicado en *PLOS Biology*, el artículo revela la tasa evolutiva durante la radiación de uno de los grandes grupos de vertebrados y apunta a los factores que podrían haber desempeñado un papel esencial en la determinación de su curso.

Los fósiles que conservan el esqueleto íntegro son sumamente raros, así que, en los estudios comparativos, los paleontólogos suelen fijar su atención en una región del cuerpo. El equipo eligió el cráneo por la multitud de funciones que desempeña: desde alojar los órganos de los sentidos, la cavidad bucal y hacer posible la masticación, hasta atraer a la pareja o servir como arma defensiva. «La morfología craneana de las aves es increíblemente diversa», observa Felice. Comparemos las rapaces con los colibríes o las palomas con los pelícanos, me propone. «¿Adquirieron esos cráneos tan distintos a través de un proceso evolutivo más rápido que el de los dinosaurios no aviares que las precedieron?», plantea. Podría parecer una pregunta con escaso margen de respuesta, pero «nos acerca a entender el modo en que brota la diversidad. Si esta es muy alta en un grupo de seres vivos, ¿acaso la ha alcanzado de improviso, de forma explosiva? ¿O a través de un proceso lento pero incesante?».

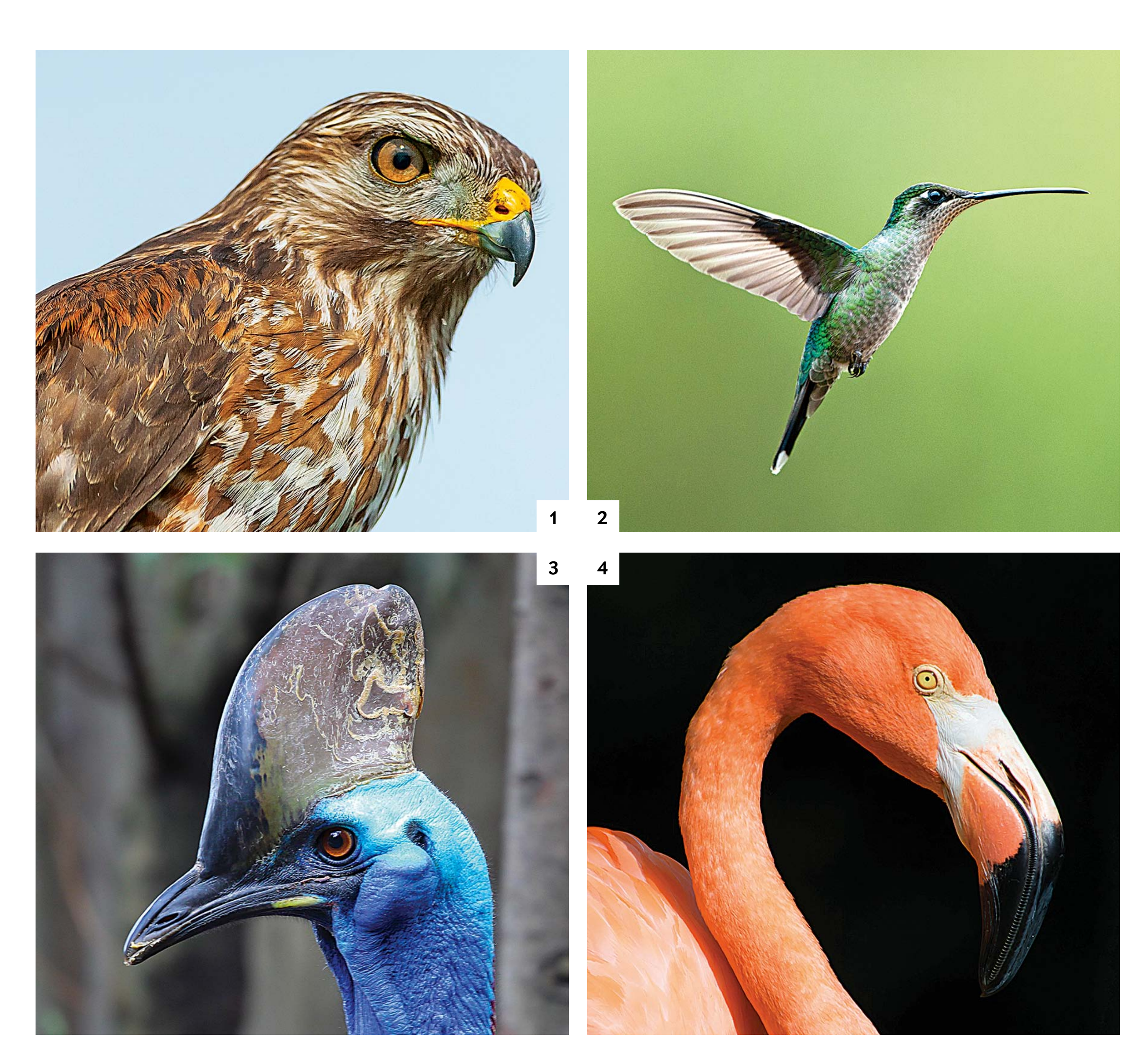
El equipo llevó a cabo un minucioso análisis morfológico de 391 cráneos en buen estado de aves vivientes y dinosaurios con tomografías (TAC) tridimensionales de alta resolución de los especímenes. Con los resultados reconstruyeron la evolución de los animales. Normalmente las comparaciones de la morfología craneana se basan en el uso de puntos de referencia establecidos (como las suturas y las prominencias del cráneo) que las especies objeto de estudio tienen en común. Pero cuanto más extenso es el grupo investigado, menos puntos de coincidencia se encuentran. Como consecuencia, los trabajos que se centran en los puntos de referencia habituales pasan por alto gran parte de la información relativa a la morfología craneana. «En nuestro enfoque tomamos esos puntos de referencia y los empleamos como anclajes para las curvas que enlazan esos puntos y, de ese modo, perfilan y delimitan cada uno de los huesos del cráneo», explica Goswami. «Nuestro enfoque automatizado toma entonces una plantilla genérica de puntos y ajusta la misma plantilla exacta a todos los especímenes incluidos en el conjunto de datos usando los puntos de referencia y las curvas para identificar las regiones de interés. De ese modo se obtienen puntos repartidos por toda la superficie de un hueso de forma coherente, tengan esos huesos

EN SÍNTESIS

Las aves conforman el grupo de vertebrados terrestres más diverso, con cerca de 10.000 especies. Además, son el último linaje descendiente de los dinosaurios.

Hasta ahora semejante diversidad se atribuía a un proceso de evolución explosivo, desatado tras la extinción de los dinosaurios y de buena parte de las demás formas de vida terrestres.

Un novedoso estudio de anatomía comparada plantea ahora que la evolución del cráneo aviar fue en realidad más lenta que la de los dinosaurios.



CON MÁS DE 10.000 ESPECIES VIVIENTES, las aves lucen una enorme diversidad de formas. Habitantes de los cinco continentes y de todos los mares del planeta, han sabido explotar una amplia variedad de nichos ecológicos. En las fotografías aparecen un busardo hombrorrojo (*1*), un colibrí magnífico (*2*), un casuario (*3*) y un flamenco (*4*).

ENRIQUE AGUIRRE AVES, GETTY IMAGES (*1, 2*); JORDAN CAPITAN, GETTY IMAGES (*3*); TASHINA VAN ZWAM, GETTY IMAGES (*4*)

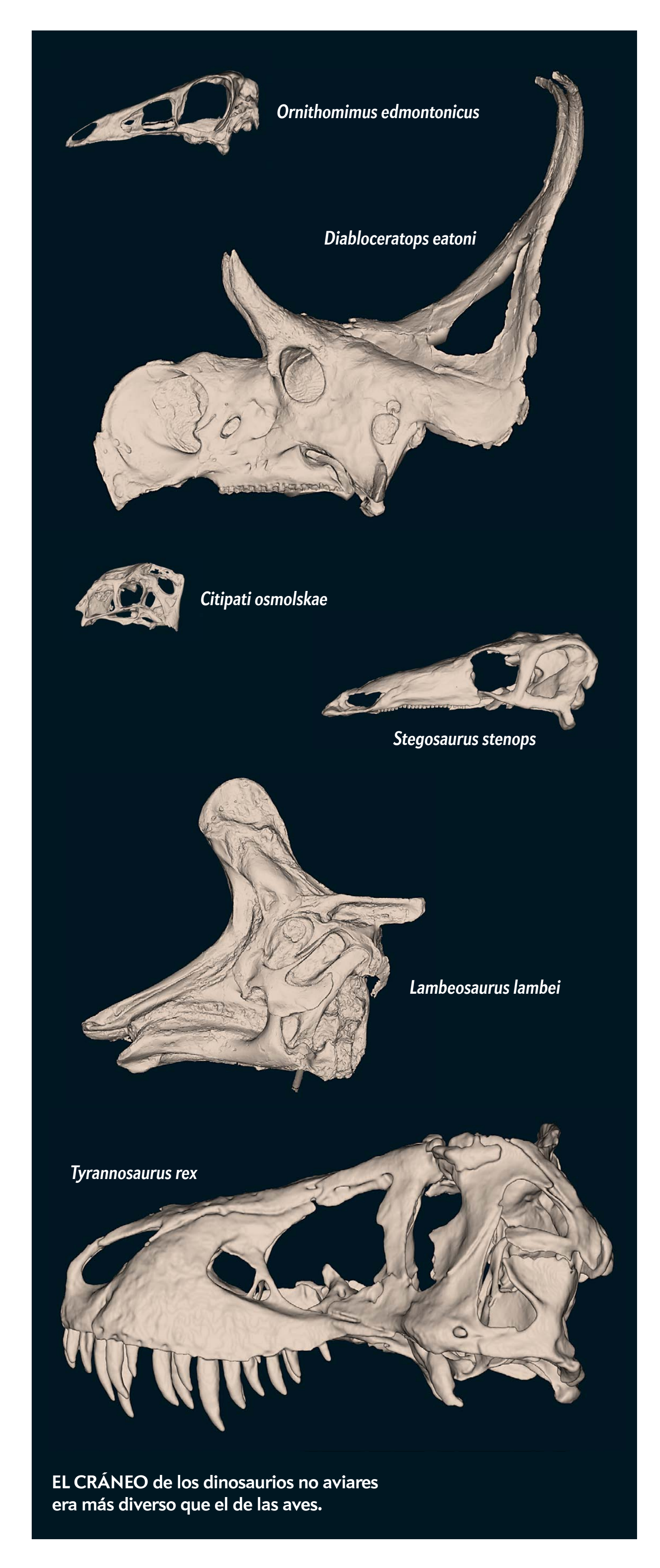
el aspecto plano de las mandíbulas situadas bajo el pico de un pato o el gran hocico dentado de un *T. rex*.»

Lo que han descubierto los autores es que todas las regiones del cráneo de los dinosaurios evolucionaron de 1,5 a tres veces más rápido que las de las aves. Tras la gran extinción que marcó el final del Mesozoico y el inicio del Cenozoico, las aves se ramificaron en la mayoría de los grandes grupos actuales, desde los colibríes y los pingüinos hasta las rapaces y las aves canoras. Pero esa diversidad surgió con mucha mayor lentitud que en los dinosaurios del Mesozoico que las precedieron. «Su tasa de variación morfológica desciende justo cuando comienza el proceso de radiación adaptativa», aclara Goswami.

¿Por qué esa repentina deceleración? Goswami cree que es consecuencia de un cambio en las prioridades de las funciones del cráneo. Mientras que los dinosaurios incorporaban en él unas estructuras refinadas de cortejo y defensa, además de integrar mecanismos de alimentación complejos que exigían amplias superficies de anclaje para la musculatura mandibular, en las aves la principal función del cráneo consiste en contener y proteger un cerebro comparativamente grande, explica.

Expertos en la evolución aviar que no han participado en esta novedosa investigación han alabado la metodología del equipo y el gran número de especies analizadas.

El descubrimiento de que los dinosaurios tuvieron un ritmo de evolución craneana más rápido que el de las aves modernas podría parecer extraño si contemplamos la diversidad de picos que lucen aves como las espátulas, los flamencos o los pelícanos, afirma Daniel Ksepka, del Museo Bruce de Greenwich, en EE.UU. Sus variadas formas sugieren una alta tasa de evolución del pico, que es uno de los principales componentes del cráneo. Pero un examen atento revela que esos picos peculiares constituyen la excepción y no la regla, asegura. «Hay un montón de



EL CRÁNEO de los dinosaurios no aviares era más diverso que el de las aves.

RYAN FELICE

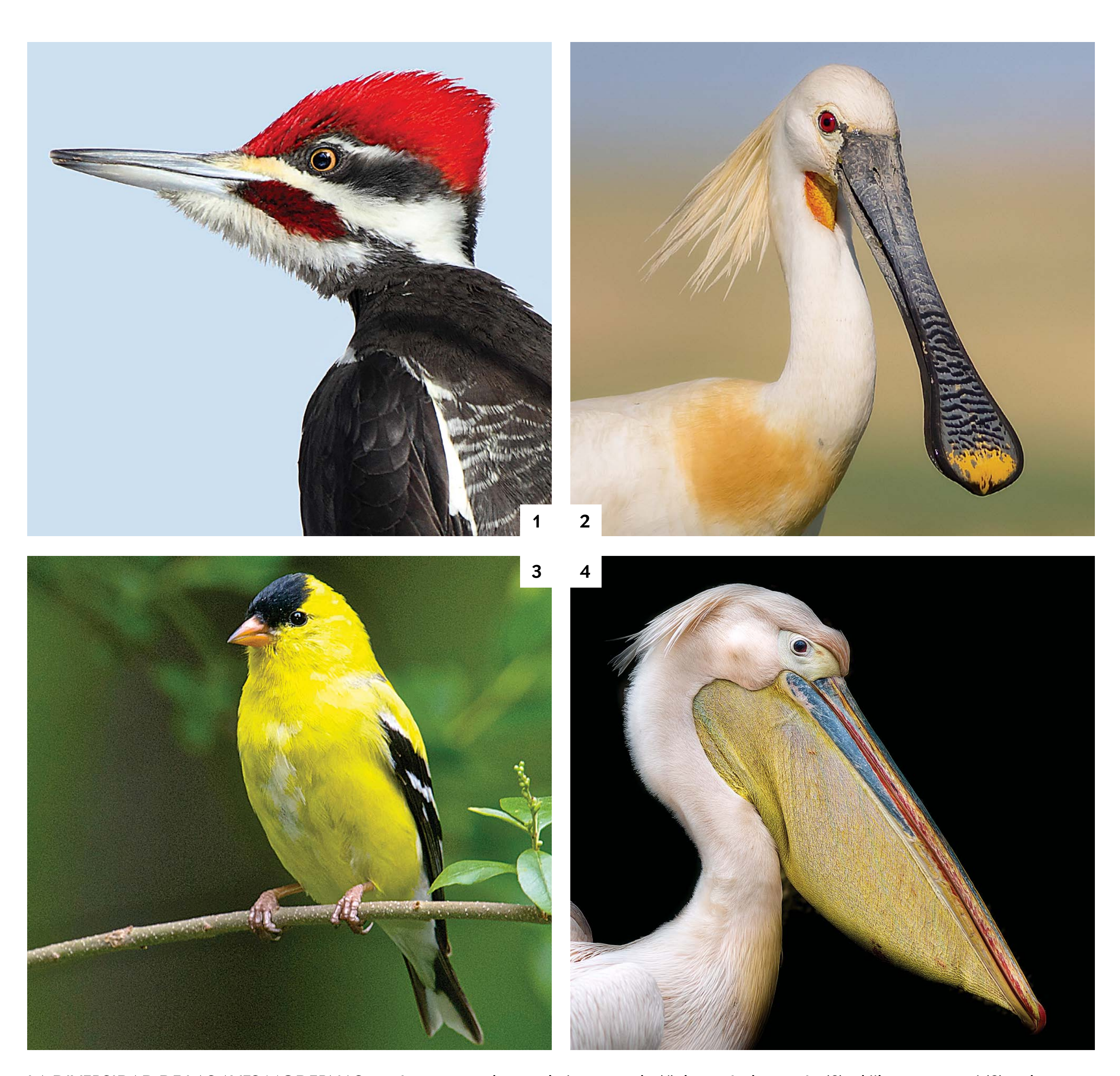
grupos con docenas de especies afines que comparten una morfología craneana bastante similar, como los sílvidos (currucas y similares) o los psitácidos (loros), lo cual indica una evolución craneana relativamente reducida», matiza Ksepka.

En cambio, algunos grupos de dinosaurios muestran tasas evolutivas altísimas en el cráneo. Por ejemplo, entre los ceratópsidos (*Triceratops* y similares) «cada especie posee un conjunto singular de cuernos y crestas. Y parecen haber evolucionado en poco tiempo por su valor para atraer a las parejas», afirma Ksepka. «Muchísimos dinosaurios tenían esos elaborados ornatos cefálicos, que tan raros son en las aves, aunque el casuario es una excepción magnífica», añade. Esta gran ave, incapaz de volar y pariente del emú que habita en las selvas tropicales de Papúa Nueva Guinea y Australia nororiental, posee una prominente cresta ósea en lo alto de la cabeza. «Lo más seguro es que el plumaje adoptase la función de exhibición y cortejo, pues tenemos muchos ejemplos de aves con cráneos de bóveda aplanada pero engalanados con bellas crestas emplumadas. Piénsese en los cardenales y las charas azules que visitan nuestros jardines [o en las abubillas y herrerillos capuchinos, en Europa].»

El descubrimiento de que los cráneos de las aves son el resultado de unas tasas evolutivas relativamente lentas «es básicamente lo contrario de lo que sabemos del resto del esqueleto», afirma Stephen Brusatte, de la Universidad de Edimburgo, otro experto externo. En estudios precedentes sobre otras partes del cuerpo, Brusatte y otros hallaron que esas regiones evolucionaron más deprisa en las aves que en otros dinosaurios. «A mi juicio esto significa que sufrieron inicialmente cambios rápidos y notables en el esqueleto, sobre todo en el proceso de transformación de las extremidades anteriores en alas. En esa transición la cabeza era secundaria y probablemente iba a la zaga del resto del esqueleto.» En las primeras etapas de su evolución, las aves dieron con un diseño cefálico acertado, dotado de atributos como el pico, unos ojos grandes y un cerebro voluminoso: «No necesitaron modificar de manera drástica ninguno de esos rasgos para adaptarse a los nichos disponibles». En lugar de eso, Brusatte cree que «una vez que las aves se escindieron de los demás dinosaurios y alzaron el vuelo, se adaptaron a los nuevos nichos alterando el tamaño corporal, la forma de las alas y el tipo de vuelo, más que la cabeza».

Esa evolución en mosaico, en la que diferentes partes del cuerpo evolucionan a velocidades distintas, ha sido común en numerosos seres vivos, incluida la especie humana. Ksepka señala que la rápida evolución craneana de los ceratópsidos contrasta vivamente con los cambios casi imperceptibles en los huesos de sus extremidades. Las currucas modernas, explica, apenas muestran cambios en la morfología del cráneo pero han desarrollado «un caleidoscopio de colores en el plumaje».

Ahora bien, Goswami tenía el presentimiento de que otras partes del esqueleto aviar podían haber evolucionado también a un ritmo relativamente pausado. El paso de la marcha cuadrúpeda a la bípeda, y viceversa, se produjo varias veces en el curso de la



LA DIVERSIDAD DE LAS AVES MODERNAS, aquí representada por el pito crestado (*1*), la espátula común (*2*), el jilguero yanqui (*3*) y el pelícano común (*4*), ha sido atribuida a un episodio fulgurante de radiación adaptativa que habría ocurrido en el período posterior a la extinción masiva del final del Cretácico. Sin embargo, nuevas investigaciones apuntan a que esa variedad magnífica sería el fruto de un proceso de evolución lento y gradual.

BRIAN LASENBY, *GETTY IMAGES* (*1*); *GETTY IMAGES* (*2*); GARY CARTER, *GETTY IMAGES* (*3*); TASHINA VAN ZWAM, *GETTY IMAGES* (*4*)

evolución de los dinosaurios no aviares y las extremidades anteriores desempeñaron múltiples funciones, destaca —compárense los diminutos brazos del *T. rex* con los robustos «pilares» de un titanosaurio—. En cambio, una vez que las aves se especializaron en el vuelo con la transformación de las extremidades anteriores en alas, entre otras adaptaciones, no volvieron a experimentar cambios anatómicos drásticos, presumiblemente por las limitaciones funcionales y corporales que entraña ser un ave. «Espero que los futuros estudios con muestras tan extensas como la nuestra comiencen a descubrir también que las aves no mantuvieron el mismo ritmo evolutivo observado en los demás dinosaurios», explica Goswami.

Por supuesto, esa ralentización no resta espectacularidad a las aves. Han sobrevivido a cataclismos planetarios, han conquistado el aire y se han diversificado en un abanico deslumbrante de prodigios alados que hoy comparten el planeta con nosotros. A paso lento pero constante ganaron la carrera.

PARA SABER MÁS

Decelerated dinosaur skull evolution with the origin of birds. Ryan N. Felice et al. en *PloS Biology*, vol. 18, e3000801, agosto de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de las aves y su vuelo. Kevin Padian y Luis M. Chiappe en *IyC*, abril de 1998.
Origen y evolución de las aves. Stephen Brusatte en *IyC*, marzo de 2017.
La increíble diversidad de las aves canoras. Kate Wong en *IyC*, abril de 2020.

NEUROCIENCIA



El trastorno de histeria en el siglo XXI

Comienzan a esclarecerse las causas de esta misteriosa enfermedad, hoy llamada trastorno neurológico funcional, que desdibuja la frontera entre la psiquiatría y la neurología

Diana Kwon

Ilustración de Vanessa Branchi



Diana Kwon es periodista científica. Escribe sobre temas de salud, biología y ciencias afines.



Todo comenzó con una tos.

Tracey McNiven, una escocesa treintañera, contrajo hace tres años una tos persistente a raíz de un episodio de bronquitis, que no remitía pese a la medicación. Con los meses fueron apareciendo otros síntomas extraños: un entumecimiento progresivo de las piernas y descoordinación. Al caminar se sentía como una marioneta, parecía que otra persona accionase los hilos. La pérdida de sensación empeoró la quincena siguiente hasta que una noche en casa se le doblaron las piernas y se desplomó: «Me quedé tirada en el suelo y me faltaba el aire, me ahogaba. No sentía nada de cintura para abajo», recuerda. Su madre la llevó a urgencias y acabaría ingresada más de seis meses.

Durante las primeras semanas de hospitalización la sometieron a un sinfín de pruebas para descubrir el origen del problema. Los médicos pensaban que podía ser neurodegenerativo, un trastorno progresivo de las motoneuronas o quizás esclerosis múltiple, una enfermedad autoinmunitaria que ataca al sistema nervioso. Pero, para gran desconcierto de todos, las exploraciones de imágenes cerebrales, los análisis de sangre, las punciones lumbares y todas las demás pruebas no revelaron nada anormal.

La situación vivida por Tracey McNiven no es infrecuente. Según una de las investigaciones más exhaustivas que se han hecho hasta hoy en los servicios de neurología, cerca de un tercio de los enfermos presentan síntomas neurológicos parcial o totalmente inexplicables. Pueden consistir en temblores, convulsiones, ceguera, sordera, dolores, parálisis y hasta coma, y remedar los de casi cualquier enfermedad neurológica. En algunos casos duran años, incluso décadas. Algunos de los afectados necesitan una silla de ruedas o quedan postrados en la cama. Son más frecuentes en las mujeres, pero pueden afectar a cualquiera y a cualquier edad.

Generaciones de científicos han intentado desentrañar estas afecciones misteriosas, que han recibido diversos nombres a lo largo de la historia, como histeria, neurosis histérica, trastorno de conversión o de somatización. Estas etiquetas, sin embargo, imponen interpretaciones particulares de lo que muchos especialistas consideran ahora una enfermedad compleja, situada en la frontera entre la psiquiatría y la neurología. Algunas denominaciones siguen vigentes, pero el término más moderno es intencionadamente neutro y denota un problema en el funcionamiento del sistema nervioso: «trastorno neurológico funcional» o TNF.

Para los afectados por el TNF, conseguir la atención adecuada solía ser una odisea. Se les acusaba de fingir o imaginar los síntomas, se les interrogaba dolorosamente en busca de traumas infantiles, a menudo en balde, y en general no se les tomaba en serio, pues los médicos no sabían cómo tratar a un paciente que, a juzgar por todas las pruebas diagnósticas habituales, estaba perfectamente sano. «Durante muchísimos años, los médicos infravaloraron la prevalencia de este tipo de trastornos y la repercusión que tienen», lamenta Kathrin LaFaver, neuróloga especializada en trastornos de la motricidad, de la Facultad Feinberg de Medicina, en la Universidad del Noroeste, en Chicago. «Estas personas han quedado atrapadas en la trinchera que separa la neurología y la psiquiatría.»

Sin embargo, desde hace unos diez años, gracias a técnicas como la resonancia magnética funcional, empezamos a entender lo que ocurre en el cerebro de los pacientes aquejados de esta enfermedad. Aplicando modelos novedosos sobre el funcionamiento cerebral, estamos comprendiendo mejor cómo surge el trastorno y cómo se podría tratar.

ENFERMEDADES ENIGMÁTICAS

Hace más de tres mil años, Mursil II, rey de los hititas, se vio atrapado en una tormenta pavorosa que lo dejó mudo. Con el tiempo,

EN SÍNTESIS

Al trastorno neurológico funcional se le han dado diversos nombres a lo largo de la historia, pero hasta fechas recientes no ha recibido la atención que merecía.

Las técnicas de neuroimagen no invasivas, como la resonancia magnética funcional, han permitido ahondar en sus causas y comenzar a plantear tratamientos tan variados como la fisioterapia, la estimulación magnética transcraneal o la meditación.

Experiencias traumáticas en la niñez o trastornos de ansiedad o afectivos estarían en la raíz del problema, que se desataría por un traumatismo o una vivencia angustiosa y se consolidaría por la falta de tratamiento o por creencias y reacciones del afectado, en algunos casos con condicionantes culturales.

recuperó el habla, pero volvió a enmudecer años después, tras despertar aterrorizado por una pesadilla que le hizo revivir aquel incidente traumático. Sus súbditos achacaron el extraño mal a la ira del dios de las tormentas, uno de los más importantes del panteón hitita. Cuando los especialistas modernos estudiaron las crónicas que recogen aquellos hechos, determinaron que había sido una afonía psicógena o funcional.

Los pueblos que sucedieron a los hititas en el devenir de los siglos también recurrieron a lo sobrenatural (divinidades, nigromancia y posesiones demoníacas) para explicar enfermedades que hoy se diagnosticarían como TNF. Según algunas interpretaciones historiográficas, el primer intento de hallar una causa racional se remonta al 400 a.C., cuando los médicos griegos, incluido el mismo Hipócrates, acuñaron el término «histeria» para describir un conjunto de alteraciones (parálisis, cefaleas, mareos y dolores, entre otras), creyendo que las causaba el útero (*hystera*, en griego), al abandonar su posición normal y vagar por el cuerpo femenino.

La histeria cobró auge en el siglo XIX, cuando dejó de atribuirse a la matriz y pasó a residir en el cerebro. Entre los médicos que la estudiaron destaca Jean-Martin Charcot, considerado por muchos el padre de la neurología. En el hospital parisino de La Salpêtrière detalló los síntomas de la histeria con minuciosidad y practicó autopsias para estudiar el cerebro de los aquejados fallecidos. No fue capaz de hallar ninguna alteración estructural, pero estaba convencido de que los problemas obedecían a lesiones fluctuantes que escapaban a los medios de investigación de la época y que denominó «lesiones dinámicas o funcionales».

Charcot también descubrió que, al contrario de lo que se creía, la histeria no era tan infrecuente en los varones, sino que muchas veces pasaba desapercibida. Señaló casos entre los trabajadores de una compañía nacional de ferrocarril, producidos a raíz de lesiones físicas aparentemente banales. Su trabajo contribuyó a difundir el estudio de la histeria e inspiró a varios investigadores, entre ellos Joseph Babinski, Pierre Janet y Sigmund Freud, que la estudiaron.

A diferencia de su antecesor, estos concebían la histeria como un trastorno de la psique, no del cerebro. Freud planteó que surgía cuando los traumas infantiles reprimidos, asociados a maltratos u otras vivencias perturbadoras, se convertían en síntomas físicos. Por eso la llamó «trastorno de conversión». Ese término reforzó el desplazamiento del trastorno desde el campo de la neurología al de la psiquiatría y sentó un dogma durante gran parte del siglo XX. Casualmente, a medida que la influencia de Freud sobre la psiquiatría fue menguando, también se redujeron los casos de trastorno de conversión, hasta el punto de que algunos lo ven como una vetusta aflicción de la era victoriana.

Al cabo de cien años, una nueva generación de investigadores centra de nuevo su atención en la enfermedad. La atenta observación de los pacientes indica que, si bien los diagnósticos se redujeron en la segunda mitad del siglo XX, el trastorno no ha desaparecido. Las últimas investigaciones lo sitúan a caballo

ANATOMÍA DEL PROBLEMA

El nexo entre el cerebro y el cuerpo

Cuando un paciente presenta síntomas somáticos (como parálisis) sin una lesión física discernible, es posible que sufra un trastorno neurológico funcional (TNF). Las técnicas de neuroimagen han revelado alteraciones sutiles en varias regiones y redes neuronales del cerebro. Algunos estudios revelan, por ejemplo, un incremento de la conectividad funcional (las correlaciones de actividad) entre las áreas que intervienen en el control de los movimientos y las que afectan a la atención y las emociones, como ilustra el dibujo. Los vínculos entre estas áreas serían un posible mecanismo fisiopatológico. También podrían estar alterados los circuitos asociados con el sentido de agencia, como la unión temporoparietal y sus conexiones.

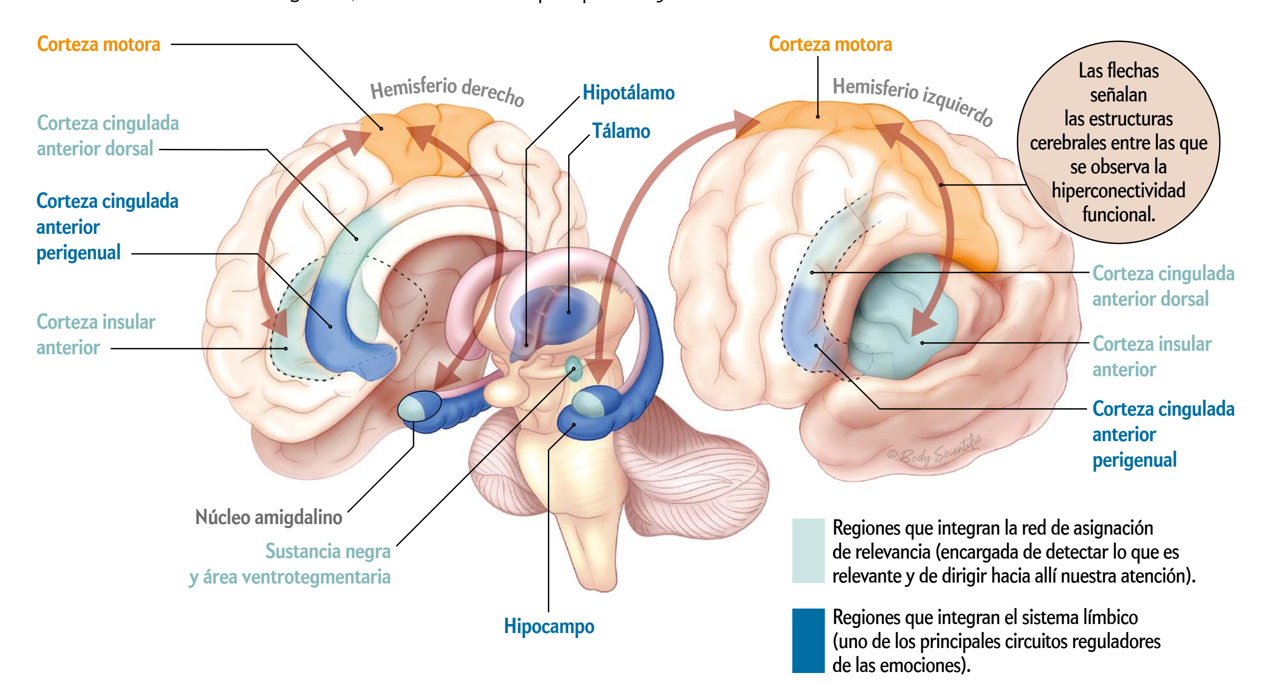


ILUSTRACIÓN DE BODY SCIENTIFIC; FUENTE: «EMOTIONAL PROCESSING IN FUNCTIONAL NEUROLOGICAL DISORDER: A REVIEW, BIOPSYCHOSOCIAL MODEL AND RESEARCH AGENDA», SUSANNAH PICK ET AL. EN *JOURNAL OF NEUROLOGY, NEUROSURGERY AND PSYCHIATRY*, VOL. 90, 2019.

entre la neurología y la psiquiatría. En 2013, un grupo de facultativos defendió la necesidad de un cambio en la nomenclatura, porque el término «trastorno de conversión» no era aceptado por todos los pacientes y aludía a los factores psicológicos como única causa. Así, en la quinta edición del *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales* (DSM-5) se incluyó el término «trastorno de síntomas neurológicos funcionales» como sinónimo de trastorno de conversión.

SIGNOS REVELADORES

Una tarde fría y soleada de febrero observo al neurólogo Jon Stone, de la Universidad de Edimburgo, pasar consulta en la Clínica Anne Rowling de Neurología Regenerativa, donde su equipo se especializa en el diagnóstico y tratamiento de los TNF. Stone escucha detenidamente cómo, cuándo y dónde aparecieron los síntomas de los pacientes. Anota todos los detalles sobre sus antecedentes patológicos y sus circunstancias personales y les hace una exploración neurológica. Luego, cual detective, compone un cuadro con los datos, intentando elaborar un diagnóstico.

Hasta hace unos años, los TNF se diagnosticaban por descarte, excluyendo las demás explicaciones, pero ahora se verifica la presencia de signos y síntomas que definen el trastorno. Estos semejan los de otros trastornos neurológicos, pero hay diferencias evidentes. Una de ellas es el signo de Hoover, en el que la debilidad de una extremidad se corrige temporalmente cuando el afectado dirige la atención a otra cosa. Otra es la sincronización del temblor: si se le pide a alguien con un temblor funcional en una mano que copie con la mano intacta un movimiento rítmico del examinador, el temblor cambia o se «sincroniza» con el ritmo de la mano no afectada. Este fenómeno no se da en las personas con trastornos neurodegenerativos como el párkinson. Por otro lado, en las convulsiones de tipo funcional también hay signos impropios de la epilepsia: las crisis se prolongan varios minutos, con temblores y respiración acelerada, en tanto que los ojos se mantienen firmemente cerrados.

Cerca de un tercio de los pacientes atendidos en unidades de neurología en Escocia presentan síntomas para los que no se encuentra una explicación orgánica

Los médicos hace décadas que conocen esos indicadores: sin ir más lejos, Charles Franklin Hoover describió el signo que lleva su nombre en el siglo XIX. Antes los signos se ocultaban a los pacientes, subraya Stone, pero él aboga por lo contrario: se los muestra para ayudarles a entender la naturaleza de su enfermedad, y considera que cada vez es más habitual proceder así. El ser consciente facilita comprender una alteración que equipara a un «problema de *software*, no de *hardware*» en el cerebro.

Este especialista se enfrentó a tales trastornos por primera vez en los años 90, poco después de acabar la carrera de medicina. Enseguida le fascinaron. De pequeño había sido tartamudo, así que sabía lo que es no poder controlar el cuerpo. Además, le disgustó el trato dispensado a los afectados por el TNF, como prefiere llamarlo: la actitud general de los facultativos era desdeñosa, como si los síntomas fuesen imaginarios, o por lo menos no como los propios de la esclerosis múltiple o del ictus. Muchos creían que no encontrarían jamás la verdadera causa o que los pacientes fingían. Como consecuencia de esta situación, los afectados no gozaban de la misma empatía, atención y asistencia que las personas con enfermedades neurológicas «orgánicas».

Stone decidió ahondar en el problema. Durante su doctorado, cursado en la Universidad de Edimburgo, conoció a Alan Carson, que entonces estudiaba psiquiatría y compartía el mismo interés. En 2002 se propusieron cuantificar el problema analizando las derivaciones a cuatro centros escoceses de neurología, a lo largo de 15 meses. Con ese estudio, que incluyó más de 3700 pacientes, descubrieron que 1144 (cerca de un tercio) presentaban síntomas neurológicos que se consideraron parcial o completamente inexplicables desde el punto de vista orgánico. De todos ellos, a los 18 meses de la primera consulta solo a cuatro se les había diagnosticado otro problema neurológico. En definitiva, el trabajo demuestra lo extendidos que están este tipo de trastornos.

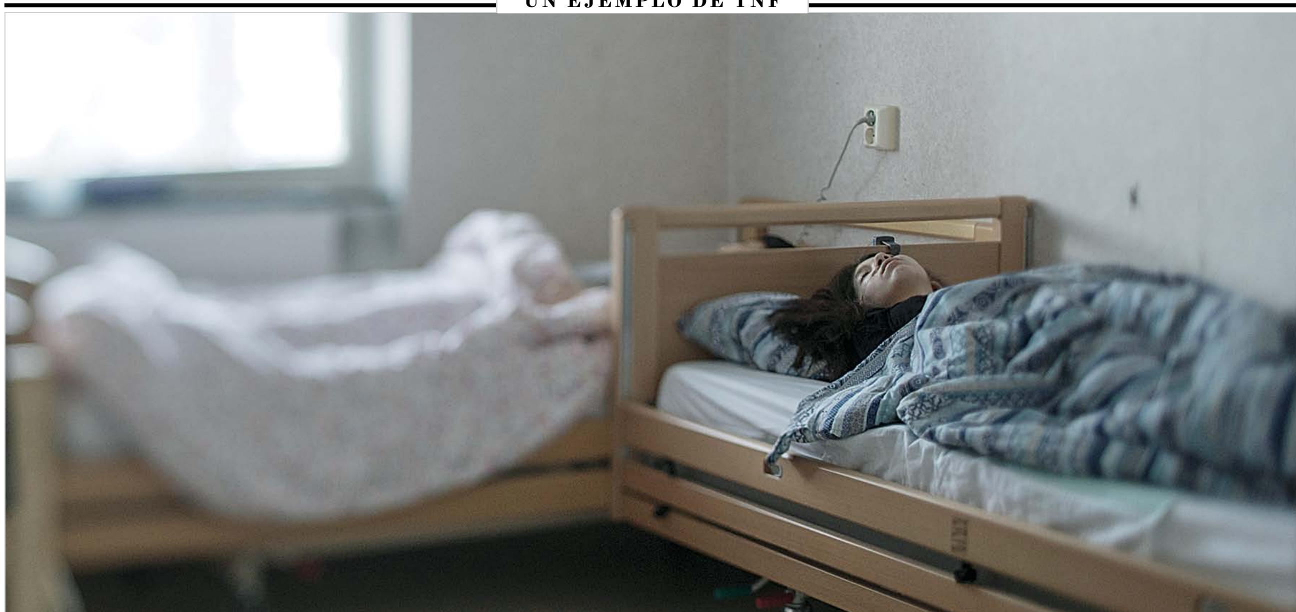
Al cabo de un tiempo, Stone y Carson aunaron esfuerzos con Mark Hallett, del Instituto Nacional de Enfermedades Neurológicas e Ictus de los Estados Unidos (NINDS), que también había hecho avances por su cuenta. Además de sus propias investigaciones, Hallett había movilizado a varios médicos y científicos que podrían contribuir al estudio de los TNF. El grupo fue creciendo poco a poco, pasando de un pequeño taller a toda una sociedad de TNF, fundada por Hallett, Carson y Stone en 2019.

ERRORES DE PREDICCIÓN

Un año después del ingreso a raíz del TNF, a Tracey la derivaron a un psicólogo. De entrada pensó que no le correspondía estar allí, porque sus síntomas habían mejorado con la fisioterapia, pero al cabo de varias sesiones descubrió algo desgarrador: había suprimido el recuerdo de unas vivencias trascendentales de su infancia. Entre otras experiencias olvidadas, había años de maltratos físicos a manos de un amigo de la familia.

Si bien entonces le costó creer que los factores psicológicos pudieran guardar relación con su enfermedad, Tracey afirma ahora que es así. «No creo que se deba solo a eso, pero sin duda tiene algo que ver», me dice. Muchos de los médicos que hoy estudian los TNF estarían de acuerdo, con ciertas reservas. A diferencia de Freud, que hacía hincapié en la represión de los traumas, ahora reconocen la implicación de un gran número de factores: predisponentes, como las experiencias negativas en la niñez, una lesión física o trastornos afectivos y de ansiedad previos; desencadenantes, como un traumatismo o una vivencia angustiosa; y consolidantes, como la falta de acceso a tratamientos adecuados, las creencias sobre la enfermedad o las reacciones del afectado ante la situación. En el actual marco conceptual de los TNF, llamado «modelo biopsicosocial», se tienen en cuenta todos ellos.

De momento no hay una idea aceptada de cómo se conjugan todas esas influencias para desatar los TNF, pero algunos señalan como responsable a una de las funciones más elementales del cerebro: el procesamiento predictivo. La teoría del procesamiento predictivo, defendida por Karl Friston, del Colegio Universitario de Londres, postula que el cerebro hace y evalúa predicciones sin cesar, en las que compara los datos generados por los órganos de los sentidos con modelos internos elabora-



El síndrome de resignación

En los años 90 empezaron a llegar de Suecia noticias de una enfermedad misteriosa: niños atendidos en urgencias en estado comatoso (inmóviles, mudos, incapaces de deglutir y arreactivos, incluso ante estímulos dolorosos) sin causa orgánica aparente. Los pacientes, que podían permanecer así meses y hasta años, presentaban ciertos rasgos en común: procedían de familias de refugiados, en general de minorías étnicas o religiosas de las antiguas repúblicas yugoslavas o soviéticas. En muchos casos, el desencadenante parecía ser la denegación de asilo a sus padres.

A inicios de la década del 2000 ya se habían descrito cientos de casos. Conforme aumentaban los afectados, la naturaleza del extraño mal suscitó un intenso debate. Algunos opinaban que los niños fingían o que los padres les habían inducido aquel trance para conseguir el permiso de residencia. Esas insinuaciones, a pesar de haber escandalizado a la clase médica y al público general, siguen circulando hoy en día. En 2014, el Consejo Nacional de Sanidad sueco declaró que se trataba de un nuevo trastorno, denominado *uppgivenhetssyndrom* (o síndrome de la «resignación», entendida como abandono o renuncia). Otros afirmaban que sería la manifestación de una enfermedad conocida, como una depresión grave, una catatonía o un trastorno de conversión.

Karl Sallin, del Hospital Universitario Karolinska, en Estocolmo, plantea que sería un trastorno neurológico funcional de base cultural. El equipo de este pediatra postula que el síndrome de resignación surge cuando los traumas psicológicos o físicos previos, el desánimo por la denegación del asilo y el miedo a la deportación concurren con creencias propias de la cultura de origen para ordenarle al cuerpo, desde el subconsciente, cómo debe reaccionar ante un intenso estrés exógeno. Sallin recalca la especificidad de esta patología, que solo afecta a ciertos colectivos de refugiados en Suecia, como muestra de la influencia que ejercen las creencias del grupo cultural. (También se han descrito casos de un trastorno semejante en la isla de Nauru, entre los solicitantes de asilo en Australia.) Por ahora, los expertos no se ponen de acuerdo.

Aunque los casos de síndrome de resignación se han reducido desde el pico de los primeros 2000, en los últimos años se ha diagnosticado la enfermedad a cientos de niños [*véase* «El enigmático síndrome de resignación», por Anna Clemens; MENTE Y CEREBRO n.º 105, 2020].

dos a partir de las experiencias vividas. Cuando las deducciones no encajan con la realidad, el cerebro o bien se actualiza para crear un modelo nuevo o bien le ordena al cuerpo que actúe conforme a las viejas predicciones, aunque no se ajusten a la nueva realidad. Por ejemplo, si uno quiere caminar pero la pierna no responde, el cerebro genera un error de predicción que solo podrá resolverse cuando se consiga mover la pierna. Friston y otros científicos proponen que, de esta forma, las predicciones determinan todas las acciones del cerebro, desde la percepción hasta el movimiento y la toma de decisiones.

El neurólogo Mark Edwards y sus colaboradores, del hospital Universitario St. George, en Londres, plantean que este sistema de predicciones falla en los TNF, de modo que el paciente hace deducciones defectuosas en relación con las sensaciones o los movimientos corporales. En un trabajo de 2012 explicaban que uno de los determinantes de estas alteraciones es la atención excesiva hacia el propio cuerpo, que sería atribuible a motivos como una enfermedad física, los trastornos afectivos y de ansiedad o los antecedentes de abusos en la infancia. Cuando surge un desencadenante como, por ejemplo, una lesión en una extremidad o una crisis de angustia, ese exceso de atención puede hacer que el cerebro efectúe predicciones anómalas sobre lo que ha de ocurrirle al cuerpo. En algunos casos, una experiencia pasada, como la enfermedad de un familiar, también puede configurar esas expectativas.

Pongamos el caso de que alguien tropieza y se hace un esguince en el tobillo, que le impedirá mover la pierna durante un tiempo. Lo normal es que las predicciones cerebrales sobre

MAGNUS WENNMAN

la motricidad de la extremidad se actualicen cuando esta recupere la movilidad. Pero la persona en cuestión tiende a padecer una ansiedad difusa, que amplifica la atención subconsciente prestada al cuerpo, además de ser muy sensible a los problemas de salud desde que el padre o la madre fallecieran. Estos factores predisponentes magnifican las sensaciones asociadas con el traumatismo; en consecuencia, el modelo interno de la pierna inmóvil persiste aun cuando se recobra la función orgánica, lo cual desemboca en una parálisis funcional. (De alguna forma, es el fenómeno contrario al síndrome del miembro fantasma, en el cual no se actualiza el error de predicción generado cuando la sensación prevista en un miembro amputado no coincide con las aferencias sensitivas reales.)

La hipótesis de que los pacientes con TNF presentan una alteración del procesamiento predictivo se ha estudiado en varios experimentos. En un estudio de 2014, Edwards utilizó una tarea denominada «igualamiento de fuerzas», en la que un aparato robotizado ejerce presión sobre un dedo y el sujeto debe igualar la fuerza con la mano. Las personas sanas tienden a sobrevalorar la fuerza ejercida con su mano porque las predicciones del cerebro «cancelan» parte de la fuerza (el mismo motivo por el que somos incapaces de hacernos cosquillas a nosotros mismos).

Gracias a las técnicas no invasivas se están descubriendo diferencias sutiles en el cerebro de las personas con trastornos neurológicos funcionales

En cambio, las personas con TNF son anormalmente precisas, lo cual demuestra que su sistema interno de predicciones funciona de otra manera. Con todo, hará falta investigar mucho más para demostrar que la teoría es correcta y que este mecanismo es responsable del trastorno.

SONDEAR EL CEREBRO

Al igual que Charcot, los investigadores contemporáneos de los TNF examinan el cerebro en busca de alteraciones. La diferencia es que ya no hay que esperar a la autopsia para explorar el interior del cráneo. Las técnicas como la resonancia magnética funcional (RMf) revelan que, en efecto, las personas con TNF presentan algunas diferencias en el cerebro. «Comenzamos a entrever la lesión dinámica que buscaba Charcot», dice David Pérez, neuropsiquiatra del Hospital General de Massachusetts, en Boston.

Gracias a la RMf se han descubierto en las personas con TNF ciertas pautas características de actividad, ausentes en los sujetos a los que se pide que imiten los síntomas, en zonas como la unión temporoparietal, asociada al sentido de agencia. Estas observaciones corroboran que los síntomas de los TNF escapan al control del individuo, a diferencia de lo que ocurre en otras afecciones como el trastorno facticio (conocido como síndrome de Münchhausen en sus formas más graves), en que el paciente finge o simula sus incapacidades somáticas.

Otro descubrimiento notable propiciado por las técnicas de neuroimagen es que, en las personas con TNF, las regiones que controlan la motricidad están más conectadas con dos circuitos cerebrales que regulan las emociones: la red de asignación de relevancia, encargada de detectar lo que es relevante y de dirigir hacia allí nuestra atención; y el sistema límbico, uno de los principales centros de control de las emociones. En un estudio de 2010, por ejemplo, el grupo de Hallett describe una mayor vinculación entre el núcleo amigdalino (región fundamental del sistema límbico) y el área motora suplementaria, responsable de preparar el inicio de los movimientos. Otros investigadores, como Pérez, han observado una hiperconectividad entre las regiones motoras y la red de asignación de relevancia, en áreas como la ínsula y el cíngulo anterior. Estos datos parecen indicar que, al menos en algunos pacientes con TNF, los circuitos emocionales habrían secuestrado el sistema motor, aclara Pérez.

El equipo de Pérez también ha observado que algunos factores de riesgo modifican la relación espacial entre estos circuitos. Según un estudio publicado el año pasado, la interrelación entre las regiones motoras y las redes afectivas está muy correlacionada con los maltratos físicos sufridos en la infancia. No obstante, Pérez recalca que esto solo concierne a los pacientes que sufren traumas: en su estudio, una parte sustancial de los participantes asegura no haber sufrido abusos de pequeños. Con todo, los hallazgos señalan que un factor de riesgo como el trauma psicológico puede alterar los circuitos cerebrales.

Asimismo, se investigan otros factores que puedan reconfigurar los circuitos cerebrales en los TNF, como el estrés. La neuróloga Selma Aybek, de la Universidad de Berna, sostiene que, si bien no todos los pacientes presentan antecedentes de traumas o estrés, lo que podría variar sería la respuesta biológica a este último. Su equipo constató en un trabajo de 2017 que, en comparación con las personas sanas, los pacientes con TNF presentan concentraciones más altas de cortisol y amilasa (biomarcadores del estrés) y se sienten peor después de una tarea estresante. A raíz de estas observaciones, están aplicando técnicas de neuroimagen para averiguar si, en tales pacientes, existe alguna asociación entre las regiones vinculadas con el estrés y las ligadas al sentido de agencia.

Poco a poco se va perfilando así la fisiopatología de los TNF. En la mayoría de estudios han participado pacientes con síntomas motores, de modo que falta explorar los síntomas sensoriales, como las alteraciones visuales. Además, muchos estudios cuentan con muestras pequeñas, por lo que será preciso validar los resultados en ensayos más amplios, advierte Valerie Voon, neuropsiquiatra de la Universidad de Cambridge, que ha colaborado con Hallett en varios proyectos innovadores. De igual modo sigue abierta la pregunta de cómo encajar los hallazgos de neuroimagen con el modelo de procesamiento predictivo. Es posible, conjetura Pérez, que muchas de las áreas identificadas hasta ahora constituyan el circuito a través del cual surgen las predicciones erróneas.

UN FUTURO MÁS HALAGÜEÑO

El verano después de cursar segundo de magisterio en Escocia, Rachael Troup, de 19 años, fue ingresada de urgencia por lo que parecía ser un ictus. La tomografía craneal descartó el infarto cerebral y los demás estudios neurológicos resultaron normales. Finalmente le diagnosticaron un TNF, pero cuando empezó el tratamiento la invadieron unos dolores atroces. Ni los médicos ni los fisioterapeutas sabían muy bien qué hacer, y los ejercicios le causaban más dolor que alivio. «Sufría dolores constantes», recuerda.

Al cabo de unos meses decidió dejar la fisioterapia. Por aquel entonces, apenas podía mover la mitad derecha del cuerpo y necesitaba una silla de ruedas. Después de varios ingresos más por crisis que parecían ictus, dio con la consulta de Stone, donde le hicieron un plan de tratamiento personalizado: se trata de una forma de fisioterapia combinada con técnicas de distracción, para apartar la atención de los miembros afectados mientras se realizan los ejercicios, a fin de intentar restablecer el control normal.

Para los pacientes con TNF, distraer la atención de los miembros afectados suele ser crucial en la fisioterapia, porque, tal como sugiere el modelo del procesamiento predictivo de Edwards, la atención es fundamental en el desarrollo de los síntomas. Al distraer la atención, el cerebro deja de ofuscarse con predicciones erróneas sobre el movimiento. El equipo de Stone está participando en un ensayo clínico aleatorizado, junto con otros centros británicos, en el que se prueba este tipo de fisioterapia especializada para los trastornos motores funcionales (los TNF que afectan a la movilidad). Además de volver a entrenar el movimiento, parte del tratamiento consiste en enseñar al paciente cómo aparecen los síntomas y los factores físicos y psicológicos que los prefiguran.

Con el propósito de ampliar las herramientas disponibles contra los TNF, también se buscan otras alternativas. En un gran ensayo clínico en el que participaron más de 300 pacientes, se evaluó la eficacia de las terapias cognitivo-conductuales (TCC) en las crisis convulsivas de tipo funcional, una serie de intervenciones orientadas a modificar los patrones anómalos de pensamiento y comportamiento. Publicados en junio de 2020 en *Lancet Psychiatry*, los resultados indican que las TCC no reducen la frecuencia de las crisis en todos los afectados.

En el Colegio King de Londres, el equipo del neuropsiquiatra Tim Nicholson estudia un método no invasivo para estimular el cerebro, denominado «estimulación magnética transcraneal» (EMT), como posible tratamiento de los TNF. Hace poco concluyeron un estudio de viabilidad, cuyos resultados son lo bastante positivos como para iniciar un ensayo clínico piloto. Se barajan varias explicaciones de cómo funcionaría la EMT. Por un lado, induce una breve contracción muscular que reiniciaría el aprendizaje motor; estimular las áreas cerebrales alteradas ayudaría a restablecer la funcionalidad, o quizá tenga un efecto placebo. El grupo de LaFaver, en la Universidad del Noroeste, en Chicago, está estudiando la aplicación de técnicas de meditación y consciencia plena; según la neuróloga, algunos pacientes aseguran que les ayuda a consolidar los beneficios del tratamiento.

Según Pérez, las psicoterapias como las TCC siguen siendo las intervenciones de primera línea para los TNF, pero urge encontrar otros tratamientos, porque el pronóstico sigue siendo malo. Es poco habitual recuperar la funcionalidad plena, y las recaídas son frecuentes. Según un metanálisis de 2014 que englobó 24 estudios, en el 40 por ciento de los casos, por término medio, los síntomas persisten o han empeorado a los siete años del primer diagnóstico. Además, los afectados sufren una gran estigmatización y dificultades para acceder a los tratamientos, añade LaFaver. «Creo que nos queda mucho camino por recorrer.»

Por suerte, la situación está cambiando. El interés científico por los TNF ha crecido en todo el mundo en el último decenio, al igual que las unidades especializadas. Los pacientes también han hecho oír su voz. En 2012 se fundó FND Hope, una organización internacional sin ánimo de lucro que persigue concienciar al público y empoderar a los afectados.

Sea como sea, el debate sigue abierto, tal como delata la disputa interminable sobre la denominación de la enfermedad. ¿Qué parte de los pacientes presenta factores psicológicos? ¿Los síntomas surgen por la conversión de factores estresantes o concurren otros mecanismos? Un metanálisis revela que el porcentaje de personas con TNF que refieren factores estresantes varía entre el 23 y el 86 por ciento, según los estudios. W. Curt LaFrance Jr., neuropsiquiatra de la Universidad Brown, afirma que se tarda más tiempo en detectar esos factores estresantes del que puede dedicarle el médico al paciente, lo cual explicaría la acusada diferencia en los porcentajes. Tanto en su consulta como en la bibliografía, constata reiteradamente que los factores psicológicos se convierten en síntomas somáticos y, por eso, defiende el término «trastorno de conversión». En parte a consecuencia de opiniones como la suya, no se eliminó el nombre antiguo cuando al DSM-5 se le añadió el sinónimo «trastorno de síntomas neurológicos funcionales», pero sí la necesidad de detectar factores psicológicos en el diagnóstico, un recorte que tampoco escapa a la polémica.

Una cosa está clara: puesto que el trastorno se halla en la frontera entre la neurología y la psiquiatría, harán falta las aportaciones de ambos campos para resolver el enigma. La línea que separa la salud mental de la física tiende a desdibujarse cada vez más. Ahora sabemos que el estrés (un factor psicológico) puede predisponer a padecer alzhéimer, y que la inflamación (un factor físico) puede causar depresión. Además, algunas enfermedades neurológicas clásicas, como la epilepsia y el ictus, a menudo se vinculan con problemas afectivos y conductuales. «El cerebro no distingue entre neurología y psiquiatría», señala Pérez. «Necesitamos una nueva ciencia del cerebro y de la mente que comprenda, de una vez por todas, que salud cerebral equivale a salud mental y salud física.»

En los últimos años, Tracey McNiven ha acabado en la silla de ruedas varias veces por culpa del TNF, pero con la ayuda de la fisioterapia y la psicoterapia ha comenzado a reponerse. Sus síntomas no han remitido por completo; todavía sufre dolores, alteraciones visuales e insensibilidad en las piernas, con días peores que otros. «Todo el tiempo siento que libro una batalla contra mi cuerpo», dice, pero espera recuperarse del todo. «Hay que mantener una actitud positiva y seguir adelante. Con esta enfermedad uno siempre tiene la esperanza de sanar.» MC

PARA SABER MÁS

The involuntary nature of conversion disorder. V. Voon et al. en *Neurology*, n.º 74 (3), 19 de enero de 2010.
Biological and perceived stress in motor functional neurological disorders. Kalliopi Apazoglou et al. en *Psychoneuroendocrinology*, n.º 85, págs. 142-150, noviembre de 2017. Publicado en línea el 1 de septiembre de 2017.
Stressful life events and maltreatment in conversion (functional neurological) disorder: systematic review and meta-analysis of case-control studies. Lea Ludwig et al. en *The Lancet Psychiatry*, vol. 5, n.º 4, págs. 307-320, 1 de abril de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Jean Martin Charcot (1825-1893). José M.ª López Piñero en *MyC*, n.º 6, 2004.
Histeria y feminidad. Marc Strauss en *MyC*, n.º 17, 2006.
Las máscaras de la histeria. Jerôme Palazzolo en *MyC*, n.º 17, 2006.
La conversión histérica, en imágenes. Patrik Vuilleumier en *MyC*, n.º 18, 2006.
La mujer marioneta. Laurent Cohen en *MyC*, n.º 94, 2019.

MATEMÁTICAS

MÁS ALLÁ DEL ÚLTIMO

Los matemáticos han averiguado cómo extender la correspondencia de Langlands, un misterioso puente que conecta dos continentes lejanos del mundo matemático

Erica Klarreich



TEOREMA DE FERMAT

Erica Klarreich es doctora en matemáticas por la Universidad de Stony Brook y diplomada en el Programa de Comunicación de la Ciencia de la Universidad de California en Santa Cruz. Sus trabajos sobre divulgación de las matemáticas han aparecido en las ediciones de 2010 y 2011 de la antología *The best writing on mathematics*, publicada por Princeton University Press.



Cuando Andrew Wiles demostró el último teorema de Fermat a principios de la década de 1990, su prueba fue aclamada como un avance colosal no solo para los matemáticos, sino para toda la humanidad. El teorema no puede ser más simple: postula que no existen tres números enteros positivos x, y, z que satisfagan la ecuación $x^n + y^n = z^n$ cuando n es mayor que 2. A pesar de su sencillez, este enunciado atormentó a legiones de entusiastas que aspiraron a demostrarlo durante más de 350 años, desde que Pierre de Fermat lo garabateara en el margen de un ejemplar de la *Aritmética* de Diofanto en 1637. Como es bien sabido, Fermat escribió que había descubierto «una demostración realmente maravillosa, que no cabe en este margen tan estrecho». Durante siglos, matemáticos profesionales y aficionados se afanaron por hallar la prueba de Fermat, o cualquier otra.

Wiles finalmente concibió una demostración (con la ayuda de Richard Taylor) que Fermat jamás habría imaginado. Abordó el teorema de manera indirecta, por medio de un monumental puente —cuya existencia ya había sido conjeturada— entre dos continentes distantes del mundo matemático, por así decirlo. La prueba de Wiles del último teorema de Fermat básicamente consistió en establecer esa conexión entre dos pequeñas regiones de los dos continentes. La demostración, rebosante de ideas profundas e innovadoras, desencadenó una cascada de resultados adicionales relacionados con los dos lados del puente.

Desde esa perspectiva, la impresionante demostración de Wiles no hizo sino resolver una pieza minúscula de un rompecabezas mucho mayor. Toby Gee, del Colegio Imperial de Londres, la considera «uno de los mejores resultados matemáticos del siglo xx». Sin embargo, no suponía más que «una pequeña esquina» de ese hipotético puente, que se conoce como correspondencia de Langlands.

El puente completo ofrecería la esperanza de iluminar vastos sectores de las matemáticas, pasando conceptos de un continente a otro. Muchos problemas que parecen difíciles en un extremo del puente, incluido el último teorema de Fermat, se transforman en otros más sencillos cuando los trasladamos al otro lado.

Tras la demostración de Wiles, otros matemáticos se lanzaron a desplegar el puente sobre regiones ligeramente más amplias de ambos continentes. Y entonces se toparon con un muro. El puente podía prolongarse de manera natural en dos direcciones distintas, pero en ambos casos el método de Taylor y Wiles se enfrentaba a lo que parecía una barrera insuperable.

«La gente le dedicó mucho tiempo», apunta Ana Caraiani, del Colegio Imperial de Londres, pero «estábamos casi convencidos de que no era posible».

Ahora, dos artículos (que representan la culminación del trabajo de más de una docena de matemáticos) han salvado esa barrera, esencialmente resolviendo ambos problemas. Con el tiempo, estos hallazgos podrían ayudar a los matemáticos a demostrar el último teorema de Fermat para otros sistemas numéricos más allá de los enteros positivos.

Estamos hablando de «resultados cruciales», asegura Matthew Emerton, de la Universidad de Chicago. «Se han descubierto varios fenómenos fundamentales de la teoría de números y apenas hemos comenzado a entenderlos.»

EN SÍNTESIS

Hace unos 50 años, Robert Langlands conjeturó la existencia de un puente entre dos «continentes» del mundo matemático, habitados respectivamente por las ecuaciones diofánticas y las formas automorfas.

La demostración del último teorema de Fermat que halló Andrew Wiles en la década de 1990 estableció esa correspondencia de Langlands entre dos pequeñas regiones de los dos continentes.

Los matemáticos enseguida comenzaron a extender el puente a regiones más amplias, pero pronto se toparon con un obstáculo. Dos recientes artículos han logrado sortearlo.

PÁGINAS ANTERIORES: DANIEL CASTRO MAIA, QUANTA MAGAZINE

UNA AGUJA EN EL VACÍO

Un lado del puente de Langlands se centra en unas de las ecuaciones más sencillas que podemos escribir: las ecuaciones diofánticas, que son combinaciones de variables, exponentes y coeficientes del tipo $y = x^2 + 6x + 8$, o $x^3 + y^3 = z^3$. Durante milenios, los matemáticos han tratado de averiguar qué combinaciones de números enteros satisfacen una determinada ecuación diofántica. Su principal motivación es que se trata de una cuestión natural y sencilla, aunque algunos trabajos recientes han encontrado aplicaciones imprevistas en campos como la criptografía.

Desde los tiempos de la antigua Grecia, los matemáticos saben hallar las soluciones enteras de las ecuaciones diofánticas con dos incógnitas y exponentes menores que 3. Sin embargo, la empresa no resulta nada sencilla cuando se abordan ecuaciones de grado superior, empezando por las curvas elípticas, que tienen el término y^2 a la izquierda del signo igual y una expresión cuya potencia más alta es 3, como $x^3 + 4x + 7$, a la derecha. Estas ecuaciones plantean un «problema muchísimo más difícil» que aquellas con exponentes más pequeños, según Gee.

En el otro extremo del puente residen las formas automorfas, objetos semejantes a las coloraciones altamente simétricas de ciertos mosaicos, o teselaciones. En los casos que estudió Wiles, el mosaico podría parecerse a los famosos «límites circulares» de M. C. Escher, discos recubiertos con figuras de peces o de ángeles y demonios que disminuyen de tamaño al aproximarse al borde. En el vasto universo de Langlands, el mosaico llenaría una esfera tridimensional o algún otro espacio de más dimensiones.

Aunque esos dos tipos de objetos matemáticos poseen características muy diferentes, a mediados del siglo XX los investigadores empezaron a desvelar profundas relaciones entre ellos. Y para principios de la década de 1970, Robert Langlands, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, ya había conjeturado la existencia de una correspondencia muy concreta entre las ecuaciones diofánticas y las formas automorfas.

En particular, existe una manera natural de generar una secuencia infinita de números a partir tanto de las ecuaciones diofánticas como de las formas automorfas. Para una ecuación diofántica, podemos contar cuántas soluciones tiene en cada aritmética modular, o «aritmética del reloj» (por ejemplo, en un reloj habitual de 12 horas, 10 + 4 = 2). Y para el tipo de formas automorfas que aparecen en la correspondencia de Langlands, podemos calcular una lista infinita de números análogos a niveles cuánticos de energía.

Langlands conjeturó que, si consideramos solo las aritméticas del reloj con un número primo de horas, esas dos secuencias numéricas coinciden en una asombrosa variedad de circunstancias. En otras palabras, dada una forma automorfa, sus niveles de energía dictan la secuencia del reloj de alguna ecuación diofántica, y viceversa.

Esa conexión es «más extraña que la telepatía», subraya Emerton. «El modo en que los dos lados se comunican entre sí [...] me parece increíble y sorprendente, a pesar de que llevo estudiándolo más de veinte años.»

En las décadas de 1950 y 1960, los matemáticos empezaron a levantar el puente en una dirección: descubrieron cómo pasar de ciertas formas automorfas a curvas elípticas con coeficientes racionales (cocientes de números enteros). Y en los años 90, Wiles, con contribuciones de Taylor, lo tendió en sentido opuesto para una determinada familia de curvas elípticas. Su resultado proporcionó una prueba inmediata del último teorema de Fermat, pues los matemáticos ya habían mostrado que si este teorema fuera falso, al menos una de esas curvas elípticas no tendría asociada una forma automorfa.



ANDREW WILES, el matemático que demostró el último teorema de Fermat, recibió el premio Abel en 2016.

ALAIN GORIELY/INSTITUTO DE MATEMÁTICAS, UNIVERSIDAD DE OXFORD

El último teorema de Fermat dista de ser el único descubrimiento que arrojó la construcción de ese puente. Los matemáticos lo han utilizado, por ejemplo, para demostrar la conjetura de Sato-Tate, un problema con décadas de antigüedad sobre la distribución estadística del número de soluciones modulares de una curva elíptica, así como una conjetura sobre los niveles de energía de las formas automorfas surgida a partir del trabajo del legendario matemático de principios del siglo XX Srinivasa Ramanujan.

Después de que Wiles y Taylor publicaran sus hallazgos, se hizo evidente que su método aún tenía recorrido. Pronto, los matemáticos averiguaron cómo extenderlo a todas las curvas elípticas con coeficientes racionales. Y más recientemente han añadido aquellos coeficientes que incluyen números irracionales sencillos, como $3 + \sqrt{2}$.

Lo que no lograron fue extender el método de Taylor y Wiles a curvas elípticas en cuyos coeficientes hay números complejos como i (la raíz cuadrada de −1), $3 + i$ o $\sqrt{2}i$. Y también se les resistieron las ecuaciones diofánticas con exponentes mucho mayores que los de las curvas elípticas: el método se puede aplicar sin dificultad cuando el exponente más alto del lado derecho de la ecuación es 4 en lugar de 3, pero deja de funcionar en cuanto aumenta a 5.

Poco a poco, los matemáticos se percataron de que esas dos siguientes ampliaciones naturales del puente de Langlands no requerían tan solo un ligero ajuste del método de Taylor y Wiles, sino que parecía existir un obstáculo fundamental.

Son «los siguientes ejemplos en los que uno pensaría», señala Gee. «Pero te dicen: "No, esas cosas están totalmente fuera de nuestro alcance".»

El problema estribaba en que el método de Taylor y Wiles busca la forma automorfa asociada a una determinada ecuación diofántica mediante aproximaciones sucesivas. Sin embargo, cuando los coeficientes de la ecuación incluyen números complejos o el exponente es mayor que 4, las formas automorfas se tornan muy escasas, tanto que para una forma dada no suele haber ninguna otra cercana que sirva para aproximarla.

En el escenario de Wiles, encontrar esa forma automorfa «es como buscar una aguja en un pajar, pero al menos el pajar existe», ilustra Emerton. «Y es casi como si hubiera limaduras de hierro en vez de paja y usáramos un imán que las alinea de modo que apunten hacia nuestra aguja.»

Pero cuando tenemos coeficientes complejos o exponentes más altos, lamenta, «es como buscar una aguja en el vacío».

VIAJAR A LA LUNA

Buena parte de los expertos actuales en teoría de números crecieron en la época de la demostración de Wiles. «Es la única vez que he visto hablar de matemáticas en la portada de un periódico», rememora Gee, que a la sazón tenía trece años. «Es algo que muchos encontraban fascinante, algo que querían entender y que hizo que acabaran trabajando en este campo.»

Así que, cuando en 2012 los matemáticos Frank Calegari, de la Universidad de Chicago, y David Geraghty (que ahora investiga en Facebook) propusieron una manera de superar el escollo que impedía extender el método de Taylor y Wiles, se desató una oleada de entusiasmo entre la nueva generación de investigadores en teoría de números.

Su trabajo mostraba que «ese obstáculo fundamental que frenaba el avance en realidad no era tal obstáculo», explica Gee. En cambio, lo que indicaban las aparentes limitaciones del método de Taylor y Wiles era que «estábamos viendo solo la sombra de la técnica más general que introdujeron Calegari y Geraghty».

«Ahora mismo, esos artículos representan una especie de cúspide. Pero llegará un momento en que los veremos como un paso más en el camino»
—Matthew Emerton

En los casos donde aflora el escollo, las formas automorfas residen en mosaicos de mayor dimensión que las teselaciones bidimensionales reminiscentes de las obras de Escher que estudió Wiles. Y en esos mundos de dimensiones superiores, las formas automorfas son inoportunamente infrecuentes. Lo positivo es que los mosaicos en dimensiones superiores a menudo poseen una estructura mucho más rica que los bidimensionales, y lo que se les ocurrió a Calegari y Geraghty fue aprovechar esa riqueza para compensar la escasez de formas automorfas.

Más concretamente, siempre que tengamos una forma automorfa, podemos usar su «coloración» del mosaico como una especie de instrumento de medida para calcular el color medio en cualquier región de dicho teselado. En el caso bidimensional, las formas automorfas son básicamente la única vara de medir disponible. Pero en dimensiones superiores surgen nuevas herramientas: las denominadas clases de torsión, que asignan a cada región del mosaico no un color medio, sino un número de una aritmética del reloj. Y tales clases de torsión abundan.

Lo que propusieron Calegari y Geraghty es que tal vez fuera posible encontrar la forma automorfa asociada a algunas ecuaciones diofánticas usando clases de torsión (en vez de otras formas automorfas) para aproximarla. «Tuvieron una idea fantástica», asegura Caraiani.

Calegari y Geraghty delinearon los planos de un puente entre las ecuaciones diofánticas y las formas automorfas mucho más amplio que el que habían erigido Wiles y Taylor. Sin embargo, su idea no representaba el puente completo. Para que funcionara, los matemáticos debían demostrar tres importantes conjeturas. Según Calegari, era como si su artículo con Geraghty explicara la manera de llegar a la Luna, pero a condición de que alguien proveyese una nave espacial, combustible para cohetes y trajes espaciales. Las tres conjeturas «excedían por completo nuestras posibilidades», admite Calegari.

En concreto, el método de Calegari y Geraghty requería la existencia previa de un puente en sentido contrario, que fuera de las formas automorfas a las ecuaciones diofánticas. Y ese puente no solo debería transportar formas automorfas, sino también clases de torsión. «Creo que, cuando Calegari y Geraghty presentaron su programa, mucha gente pensó que se trataba de una dificultad insalvable», señala Taylor, que en la actualidad trabaja en la Universidad Stanford.

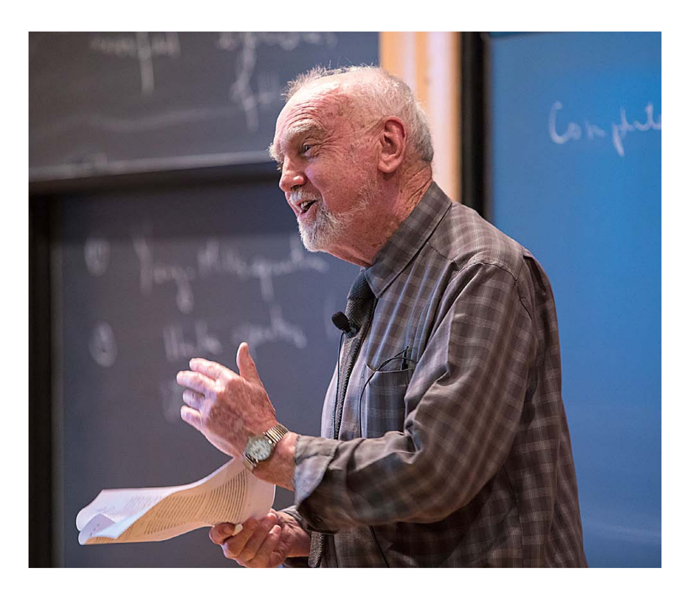
Y sin embargo, menos de un año después de que Calegari y Geraghty publicaran su artículo en línea, el matemático de la Universidad de Bonn Peter Scholze (que más adelante recibiría la medalla Fields, una de las mayores distinciones en matemáticas) asombró a los expertos en teoría de números: descubrió cómo pasar de las clases de torsión a las ecuaciones diofánticas en el caso de curvas elípticas con coeficientes dados por números complejos simples como $3 + 2i$ o $4 - \sqrt{5}i$. «Scholze ha realizado multitud de aportaciones interesantes, pero quizás este sea su logro más fascinante», valora Taylor.

Scholze había demostrado la primera de las tres conjeturas de Calegari y Geraghty. Y en un par de artículos posteriores, Scholze y Caraiani estuvieron cerca de probar la segunda conjetura, lo que implica confirmar que el puente de Scholze posee las propiedades adecuadas.

Empezaba a parecer que la meta estaba al alcance de la mano, de modo que en otoño de 2016, con el propósito de seguir avanzando, Caraiani y Taylor organizaron lo que Calegari denomina un encuentro «secreto» en el Instituto de Estudios Avanzados. «Nos apoderamos de la sala de conferencias y no dejamos que entrara nadie más», recuerda Calegari.

Tras un par de jornadas de ponencias, los participantes comenzaron a intuir cómo despachar la segunda conjetura y sortear la tercera. «Una vez expuestos todos los problemas, puede que tardáramos un día en resolverlos», asevera Gee, que también estuvo presente.

Los participantes dedicaron el resto de la semana a desarrollar diversos aspectos de la demostración, y los dos años siguientes a describir sus hallazgos en un artículo firmado por diez autores, una cifra casi inaudita en el campo de la teoría de números. En esencia, ese trabajo establece el puente de Langlands para curvas elípticas con coeficientes extraídos de cualquier sistema numérico formado por los números racionales y los complejos e irracionales sencillos.



ROBERT LANGLANDS, que conjeturó la influyente correspondencia de Langlands hace unos 50 años, durante una charla que impartió en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton en 2016.

«El plan original [del encuentro] era simplemente ver hasta dónde podíamos llegar», reconoce Gee. «No creo que nadie pensara que íbamos a conseguir demostrar el resultado.»

LA EXTENSIÓN DEL PUENTE

Mientras tanto, se desarrollaba una historia paralela encaminada a extender el puente más allá de las curvas elípticas. Calegari y Gee habían trabajado con George Boxer (actualmente en la Escuela Normal Superior de Lyon) en el problema donde el mayor exponente de la ecuación diofántica es 5 o 6 (en vez de 3 o 4, los casos que ya se conocían). Pero los tres matemáticos se habían quedado atascados en un punto crucial de su razonamiento.

Entonces, el fin de semana siguiente al encuentro secreto, Vincent Pilloni, también de la Escuela Normal Superior de Lyon, publicó un artículo que mostraba precisamente cómo salvar ese obstáculo. «¡Tenemos que dejar lo que estamos haciendo y colaborar con Pilloni!», se dijeron de inmediato los otros tres investigadores, de acuerdo con Calegari.

En unas pocas semanas, los cuatro matemáticos habían resuelto también ese problema, aunque necesitaron dos años y casi 300 páginas para desarrollar sus ideas por completo. Su trabajo y el artículo con diez autores se publicaron en línea a finales de diciembre de 2018, con tan solo cuatro días de diferencia.

«Creo que son trascendentales», afirma Emerton sobre esos dos artículos, y describe ambos y los resultados previos que los hicieron posibles como «punteros».

Aunque esas dos publicaciones demuestran que la misteriosa telepatía entre las ecuaciones diofánticas y las formas automorfas trasciende a nuevos escenarios, cabe advertir que no tienden un puente perfecto entre los dos continentes. En cambio, ambos trabajos establecen una «automorfía potencial», lo cual significa que cada ecuación diofántica se corresponde con una forma automorfa, pero no estamos seguros de que esta última resida en la región del continente donde esperarían encontrarla los matemáticos. No obstante, esa automorfía potencial es suficiente en numerosas aplicaciones, como la conjetura de Sato-Tate antes mencionada, que el artículo de los diez autores logró demostrar en contextos mucho más amplios.

Y los matemáticos ya han empezado a vislumbrar cómo mejorar estos resultados. Por ejemplo, en octubre de 2019, Patrick Allen, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Chandrashekhar Khare, de la Universidad de California en Los Ángeles, y Jack Thorne, de la Universidad de Cambridge, demostraron que una proporción sustancial de las curvas elípticas estudiadas en la publicación de los diez autores poseen puentes que van a parar justo al lugar correcto.

Esos puentes más precisos podrían permitir a los matemáticos probar toda una serie de nuevos teoremas, entre los que figura una generalización centenaria del último teorema de Fermat. Dicha conjetura afirma que la ecuación central del teorema sigue sin tener soluciones aunque permitamos que x, y, z sean combinaciones de números enteros y el número imaginario i.

Los dos artículos que han desarrollado el programa de Calegari y Geraghty constituyen una importante prueba de concepto, comenta Michael Harris, de la Universidad de Columbia. Son «una demostración de que el método posee un amplio espectro de posibilidades», añade.

Pese a que esos nuevos trabajos han logrado conectar regiones mucho más amplias de los dos continentes de Langlands, hay vastos territorios que restan inexplorados. Del lado de las ecuaciones diofánticas, aún quedan las ecuaciones con exponentes mayores que 6, así como aquellas con más de dos variables. Del otro lado están las formas automorfas que habitan espacios simétricos más complicados que los estudiados hasta la fecha.

«Ahora mismo, esos artículos representan una especie de cúspide», señala Emerton. Pero «llegará un momento en que los veremos como un paso más en el camino».

El propio Langlands nunca consideró la torsión al pensar en las formas automorfas, así que un reto al que se enfrentan los matemáticos es alcanzar una visión unificada de todas estas ideas. «Estamos yendo un paso más allá», concluye Taylor. «Hasta cierto punto, hemos abandonado el camino abierto por Langlands y no sabemos muy bien adónde nos dirigimos.» IyC

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

Elementary introduction to the Langlands program. Edward Frenkel. Serie de charlas impartidas en 2015. Disponible en https://bit.ly/3otts0S.

On torsion in the cohomology of locally symmetric varieties. Peter Scholze en *Annals of Mathematics*, vol. 182, n.º 3, págs. 945-1066, noviembre de 2015.

Modularity lifting beyond the Taylor-Wiles method. Frank Calegari y David Geraghty en *Inventiones Mathematicae*, vol. 211, n.º 1, págs. 297-433, enero de 2018.

Abelian surfaces over totally real fields are potentially modular. George Boxer et al. en **arxiv.org/abs/1812.09269**, diciembre de 2018.

Potential automorphy over CM fields. Patrick B. Allen et al. en **arxiv.org/abs/1812.09999**, diciembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fermat, demostrado al fin. Yves Hellegouarch en *IyC*, junio de 1996.

El último reducto de Fermat. Simon Singh y Kenneth A. Ribet en *IyC*, enero de 1998.

La unificación de las matemáticas. Kevin Hartnett en **www.investigacionyciencia.es**, 27 de marzo de 2018.

por Fernando Calderón Quindós



Fernando Calderón Quindós es profesor de historia de la filosofía en la Universidad de Valladolid. Centra su investigación en la filosofía de la historia natural.

Polémica vegetal

¿Tienen las plantas inteligencia y sensibilidad?

Imaginamos la botánica como un campo de científicos risueños, tan risueños como las plantas nos lo parecen. Pero también entre los botánicos se cuecen habas. La discusión ha llegado a su campo como consecuencia de las declaraciones formuladas por Stefano Mancuso, profesor de la Universidad de Florencia y director del Laboratorio Internacional de Neurobiología Vegetal. En *Sensibilidad e inteligencia en el mundo vegetal*, su obra más exitosa, asegura que las plantas son inteligentes y sensibles: «Se comunican e intercambian información, duermen, memorizan, cuidan de sus hijos, tienen su propia personalidad, toman decisiones e incluso son capaces de manipular a otras especies». Casi nada. Evidentemente, hay aquí una dosis de atrevimiento, y es que Mancuso y los neurofitólogos se enfrentan a la opinión común y al buen juicio ordinario. Más aún, se enfrentan a muchos de sus colegas, algunos de los cuales han mostrado su discrepancia a través de un manifiesto publicado en *Trends in Plant Science*. Para los 36 científicos firmantes, los defensores de la neurobiología vegetal «malinterpretan los datos y caen en teleologías, antropomorfizaciones, filosofizaciones y especulaciones absurdas», en lo que hay no poco de acritud, y hasta una forma muy poco cortés de enjuiciar la labor de la filosofía. Intentemos comprender el asunto.

Es bien conocida la imagen evangélica de los lirios: «no trabajan ni hilan». Los lirios —las plantas en general— son el emblema de la existencia despreocupada y bella, pero también de la existencia estúpida y dormida. Tan difundida está la imagen, que parece cierta sin que lo sea. Fascina, y esa fascinación procede de su vigencia multisecular, a la que la ciencia y la filosofía contribuyeron durante largo tiempo. La idea de la gran cadena del ser y el dibujo piramidal de la naturaleza, dos tópicos de amplísima aceptación, nacen en la Grecia clásica. Y desde entonces, las plantas han aparecido en el intermedio entre los animales y los minerales. Según este esquema, el pulgón o la oruga, no menos que el elefante o el hipopótamo, se situarían lejos de la grosera existencia de las piedras; por contra, las plantas se alojarían en vecindad con lo inorgánico y, en consecuencia, en inquietante proximidad con una naturaleza estéril, pasiva y roma.



GETTY IMAGES/WILDPIXEL/ISTOCK

Los dos tópicos se encontraban en pleno apogeo cuando Descartes promovió una forma de ontología gris. Y también un siglo más tarde, cuando Linneo irrumpió en el mundo de la botánica. Interesado como lo estaba en clasificar y nombrar las plantas, dejó de lado lo que pudiera estorbar a su objetivo. Los pigmentos coloreados de las flores, el sabor y perfume vegetales, los negaba sin miramientos en su *Philosophia botanica* de 1751: «Toda diferencia [de especie] necesariamente se debe tomar del número, situación, figura y proporción de las varias partes de las plantas». Lo demás importaba poco. Y fueron disposiciones de esta naturaleza las que perpetuaron el desalojo de los rasgos subjetivos (color, olor o sabor entre ellos), sin los que, por cierto, la botánica desbarataba la preciosa oportunidad de comprender las plantas en su universo de relaciones con otras plantas y animales. Nada sorprendente entonces que los naturalistas del XVIII convirtieran en sus objetos de predilección a los herbarios, allí donde la planta, despojada de sus elementos periféricos, muerta y felizmente mineralizada, mejor exhibía su diferencia. Como seres relativos, los vegetales no interesaban, y ni la inteligencia ni la sensibilidad podían adivinarse en criaturas que solo importaban recortadas de otras formas de existencia colindantes.

En poco tiempo, el inventario de especies vegetales se engrosó maravillosamente. Los jardines se popularizaron. Arriates y parterres vinieron a embellecer las ciudades y, todo ello, sin que las plantas se conocieran mejor. Se les atribuía belleza y poco más. Sin asomo de inteligencia, reducida su facultad sensible a contadísimos casos siempre discutidos, el vegetal pasó al discurso de Buffon como «un animal que duerme». «El animal tiene dos

maneras de ser, el estado de movimiento y el estado de reposo, la vigilia y el sueño», y el sueño es «un estado puramente pasivo, una especie de muerte». En buena lógica, comprendía que el hombre es al principio una criatura dormida, un ser «privado de movimiento progresivo, de acción, de sentimiento». Asimismo la planta, cuya inmovilidad significaba ausencia total de percepción, sensibilidad o inteligencia. También, claro está, de conciencia. Pero, ¿es así realmente?

El movimiento no es una realidad ajena al mundo vegetal. Si lo imaginamos estático es solo porque no lo vemos bien. Las plantas se mueven, aunque lentamente y según sus necesidades, no según las nuestras. La dificultad reside en interpretar correctamente ese fenómeno, porque podemos comprenderlo como un ciego automatismo o como una respuesta inteligente que, si no significa autoconciencia, tal vez sí suponga tener conciencia sin más. Walter Benjamin ya aventuraba en una reseña titulada «Algo nuevo acerca de las flores» (1912) que nuestra imagen del mundo cambiaría con la fotografía, y que bastaba con acelerar el crecimiento de una planta con ayuda de un temporizador para asomarnos a un mundo de sorpresas incontables. No parecía pensar en cosas como la sensibilidad o la inteligencia, pero barruntó en el movimiento vegetal un asunto de discusión filosófica. Pocos años antes, Henri Bergon, autor de la *Evolución creadora* (1907), ya había señalado que «entre la movilidad y la conciencia hay una relación evidente», pero hablaba solo de movilidad animal. Y es que, para él, para nosotros también, lo vegetal tiene la apariencia de un cuadro.

Hubo y también hay algunas excepciones. De hecho, son varios los científicos y filósofos que se han interesado por las plantas y reconocido en ellas rasgos que, por lo común, se dicen solo de los animales. Leibniz, por ejemplo, les concede «percepción y apetición», aunque sin conciencia; Cuvier habla de «movimientos espontáneos» y de una «especie de sensación y voluntad»; y de parecida opinión era su contemporáneo Henri Dutrochet, padre de la teoría celular. Si el estado de la ciencia no permitía hablar de sensibilidad vegetal *sensu stricto*, entonces había que hacerlo de «nervimotilidad», neologismo que no prosperó, pero con el que Dutrochet vino a señalar un rasgo en el que el propio Darwin insistiría más tarde, en su libro *The power of movement in plants* (1880): que, aunque sin cerebro, existe en la raíz un órgano vegetal análogo capaz de desempeñar funciones parecidas. Los neurofitólogos, Mancuso a la cabeza, le han dado la razón.

Percibimos las plantas como un mundo de inocencia. Las vemos bajo nuestros pies y sobre nuestra cabeza como elementos perfectamente fijos. Y en ese punto, su parecido nos resulta mayor con las estrellas del cielo que con sus vecinos animales. De ahí que aparezcan ante nosotros como realidades sustraídas del tiempo, sin parentesco con las otras formas de vida y como desprendidas, por decirlo así, de la historia de la evolución. Cuando en 1694 Camerarius publicó su *De sexu plantarum epistola*, la carta en la que informaba de la sexualidad de las flores, una mezcla de estupor y desconcierto sacudió la Europa culta. Cuando, más tarde, Linneo se sirvió de estambres y pistilos para fundar sobre ellos su sistema de clasificación, la polémica se reavivó entre quienes aprobaban la audacia y se divertían con ella, y quienes, más recatados y conservadores, simplemente se indignaban: ni las plantas podían explicarse sobre bases tan indecentes —a veces, incluso, incestuosas—, ni la sexualidad alojarse en las corolas. ¿Cómo, si incluso hay animales sin sexo?

Las plantas se mueven, aunque lentamente y según sus necesidades, no según las nuestras

La tormenta desencadenada por el descubrimiento de Camerarius trastornó el sereno discurrir de la botánica. Hoy, una nueva tormenta la sacude. No en vano, interrogarse por cosas tales como la sensibilidad o la inteligencia vegetal supone trasladar el mundo de la subjetividad a entidades tales como una encina, un drago o una simple y vulgar amapola, entidades a las que solo en rarísimas circunstancias estaríamos dispuestos a tratar como individuos; y no, por cierto, en un sentido propio y real, sino en un sentido meramente translaticio.

El asunto ha sido tratado alguna vez por la filosofía, aunque escasamente. El profesor Jean-Marc Drouin recuerda en *L'herbier des philosophes* que Kant, por ejemplo, examinó los distintos modos de individuación comunes a las plantas en su *Crítica del juicio*, y que Hegel no tuvo reparos en hablar de individuos vegetales en su *Enciclopedia de las ciencias filosóficas*. Ninguno de los dos, sin embargo, se detuvo en examinar la derivación moral de ese reconocimiento. Kant puso el acento en la dignidad del hombre pero, como Descartes, cosificó el mundo de la naturaleza no humana. Por su parte, Hegel decidió apelar al diseño modular de las plantas para negarles la condición de individuos plenamente constituidos.

Me parece que el asunto de la inteligencia y de la sensibilidad de los vegetales está aún sin resolver. Algo, no obstante, ha cambiado. Sin que podamos concluir nada categóricamente, no hay duda de que las últimas investigaciones han erosionado nuestra forma de percibir las plantas. Se trata de ver ahora si es posible adjudicarles esa condición sin que nuestra comprensión de su naturaleza se vea distorsionada por la certeza inequívoca de que, en última instancia, nuestra supervivencia depende de ellas —si les reconocemos inteligencia y sensibilidad, ¿debería cambiar nuestro trato hacia ellas en la línea de lo que está pasando con los animales? ¿O tal vez estemos tentados a no reconocer esas capacidades para así facilitarnos la vida o, al menos, no dificultárnosla más aun?

Desde luego, son comprensibles las reservas que algunos botánicos eminentes han opuesto a las tesis de Mancuso, pero sus dudas no las vuelven irrazonables, como tampoco es disparatado pensar que sean ellos quienes, queriendo conjurar el error, se aparten de la verdad. IyC

PARA SABER MÁS

Éloge de la plante. Pour une nouvelle biologie. Francis Hallé. Seuil, 1999.
L'herbier des philosophes. Jean-Marc Drouin. Seuil, 2008.
Los movimientos y hábitos de las plantas trepadoras. Charles Darwin. Catarata, 2009.
Sensibilidad e inteligencia en el mundo vegetal. Stefano Mancuso y Alessandra Viola. Galaxia Gutenberg, 2013.
Filosofía vegetal. Cuatro estudios sobre filosofía e historia natural en el siglo XVIII. Cap. 2. Fernando Calderón Quindós. Abada, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Vegetales con visión. Marta Zarasca en *IyC*, enero de 2017.
¿Pueden oír las plantas? Marta Zarasca en *IyC*, septiembre de 2017.

por José Manuel López Nicolás



José Manuel López Nicolás, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.

Complementos alimenticios, interferón y COVID-19

La llegada del nuevo coronavirus ha disparado las ventas de controvertidos suplementos contra el SARS-CoV-2

Desde la llegada del SARS-CoV-2 se ha multiplicado la oferta de complementos alimenticios que prometen reforzar el sistema inmunitario. Pero, a pesar de la gran cuota de mercado que han alcanzado, son muchas las dudas que existen acerca de su efectividad.

La mayoría de estos suplementos publicitan que «ayudan al normal funcionamiento del sistema inmunitario» y contienen «ingredientes estrella» como jalea real, *Lactobacillus casei*, propóleo o equinácea. Sin embargo, según la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), no se ha demostrado que ninguno de estos ingredientes potencie nuestras defensas. Entonces, ¿por qué los fabricantes pueden poner en el envase que «ayudan al sistema inmunitario»? Pues por la simple presencia en su composición del 15 por ciento de la cantidad diaria recomendada de al menos uno de los micronutrientes que sí tiene un informe positivo de la EFSA relacionado con el sistema inmunitario: cobre, ácido fólico, hierro, selenio, vitamina A, vitamina B12, vitamina B6, vitamina C, vitamina D y zinc.

¿Y la presencia de estos micronutrientes hace que los suplementos alimenticios sean eficaces contra el SARS-Cov-2? En absoluto. Para empezar, en general no tenemos déficit de estos micronutrientes. Además, por el hecho de incrementar más su consumo nuestro sistema inmunitario no va a reforzarse.

Podría ponerles muchos ejemplos de suplementos y alimentos funcionales que emplean este tipo de estrategia comercial. Pero hay un grupo muy de moda que me llama especialmente la atención: aquellos en cuyo envase aparecen palabras muy parecidas —pero no iguales— a *interferón*. Analicémoslos.

Los interferones son un grupo de proteínas señalizadoras que las células producen en respuesta a la presencia de diversos patógenos, tales como virus, bacterias, parásitos y células tumorales. Un consorcio integrado por numerosos centros de investigación y hospitales publicó el pasado agosto en *Science* un artículo donde se mostraba que el interferón de tipo I estaba implicado en el 15 por ciento de los casos más graves de COVID-19. Un porcentaje elevado de estos pacientes graves presenta en la sangre anticuerpos que atacan a este interferón, lo eliminan e impiden así que el sistema inmunitario contraataque al virus. El hallazgo, enmarcado dentro de la iniciativa internacional Covid Human Genetic Effort, sugiere que esta molécula podría estar implicada en el hecho de que algunas personas infectadas no presenten síntomas, mientras que otras, sin patologías previas e incluso jóvenes, acaben desarrollando neumonías graves.



¿De qué forma podría solucionarse este problema? Según un estudio publicado en noviembre en *The Lancet Respiratory Medicine*, la administración de interferón beta-1a por vía inhalada a pacientes hospitalizados con COVID-19 puede duplicar las posibilidades de recuperación y reducir el riesgo de desarrollar los síntomas más severos de la enfermedad.

Pero no nos confundamos. Ningún complemento alimenticio contiene interferón. Lo que sí encontramos en parafarmacias son suplementos en cuyo envase se leen palabras muy parecidas a *interferón*. ¿Y son efectivos estos complementos contra el SARS-Cov-2? Repito: no. Como mucho, refuerzan el sistema inmunitario igual que lo hace cualquier otro producto que contenga ingredientes como vitamina C, vitamina D o Zinc.

Entonces, ¿necesitamos «suplementarnos» con estos micronutrientes para potenciar nuestras defensas? No. La población adulta española multiplica entre dos y cuatro veces el consumo aconsejado de vitamina C. Además, un puñado de naranjas o limones, un kiwi o unas pocas fresas contienen más vitamina C que muchos complementos alimenticios cuyo precio se acerca a los 30 euros. El zinc lo encontramos en las ostras, carnes rojas o de ave y mariscos. Por último, los pescados grasos (salmón, atún y caballa), el hígado vacuno, el queso o la yema de huevo son las mejores fuentes de vitamina D, un micronutriente en continuo estudio por su posible relación con la COVID-19 (un trabajo reciente publicado en *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* muestra cómo un análogo de la vitamina D, el calcifediol, no previene el contagio ni cura la enfermedad, pero sí podría ayudar a reducir su gravedad administrado en forma de medicamento, no de complemento alimenticio).

Concluyo. No existen pruebas de que los complementos alimenticios prevengan ni curen la COVID-19. Y los micronutrientes que sí han demostrado tener algún efecto positivo para nuestras defensas (no contra el SARS-CoV-2) se encuentran de forma natural en numerosos alimentos, mucho más baratos que cualquier suplemento. Nada más que decir. IyC

SUSCRÍBETE A INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
  ~~82,80 €~~ 75 €
  por un año (12 ejemplares)
  ~~165,60 €~~ 140 €
  por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción

Y además elige 2 números de la colección TEMAS gratis





www.investigacionyciencia.es/suscripciones
Teléfono: +34 935 952 368



La conservación de la biodiversidad cultivada

En la actual era de globalización agroalimentaria, ¿qué papel deben desempeñar las variedades agrícolas tradicionales? ¿Qué estrategias permiten mantener y fomentar la biodiversidad de los cultivos mediterráneos?

Francesc Casañas, Joan Simó y Joan Casals

LOS BANCOS DE SEMILLAS son las instalaciones más seguras para la conservación de variedades a medio y largo plazo. Facilitan la catalogación ordenada de las muestras y aseguran la conservación a una baja temperatura y humedad. La fotografía corresponde al banco del Instituto Universitario de Conservación y Mejora de la Agrobiodiversidad Valenciana.



Francesc Casañas es profesor jubilado de mejora genética en la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, de la Universidad Politécnica de Cataluña, e investigador de la Fundación Miquel Agustí.

Joan Simó es investigador de la Fundación Miquel Agustí y profesor de la Universidad Politécnica de Cataluña. Sus investigaciones se centran en la mejora genética de plantas hortícolas.

Joan Casals es director científico de la Fundación Miquel Agustí y profesor de la Universidad Politécnica de Cataluña. Se interesa por la mejora genética del tomate y la mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos hortícolas.

Hace unos 12.000 años, nuestros antepasados iniciaron una nueva relación con algunas de las plantas silvestres de las que se alimentaban. Empezaron a modificar el entorno donde estas vivían para favorecer su crecimiento. Procuraron que se desarrollaran sin la competencia de otras plantas ni el consumo de otros animales herbívoros, y que dispusieran de más agua y nutrientes. A cambio, nuestros ancestros obtuvieron una fuente de alimentos más abundante y segura. Mientras que consumían una parte de la cosecha, utilizaban otra para fundar una nueva generación de plantas. El resultado fue una alianza de éxito asombroso, una suerte de simbiosis que permitió tanto a los humanos como a las plantas asociadas con ellos medrar de modo exponencial sobre la Tierra.

A lo largo de esta fructífera relación, ambos «simbiontes» coevolucionaron. Los humanos nos convertimos en una pieza indispensable en el ciclo biológico de las plantas domesticadas y moldeamos su evolución. Las plantas cultivadas se fueron diferenciando progresivamente de las silvestres, a menudo a través de pequeños cambios genéticos que tuvieron una gran trascendencia en el fenotipo. A su vez, nuestra especie también evolucionó, en especial en la vertiente cultural y, en menor medida, en la componente genética. Fuimos cambiando la forma de vivir, nuestras preferencias sensoriales y culinarias y, en consecuencia, las cualidades que exigíamos a las plantas cultivadas. Desarrollamos nuevos conocimientos y tecnologías que nos permitieron intervenir con más eficiencia sobre el entorno, lo que benefició aún más a nuestras asociadas.

Desde mediados del siglo xx, dicho proceso se aceleró gracias sobre todo a los progresos extraordinarios logrados en la mejora genética vegetal, que nos ayudaron a seleccionar las variedades más productivas. Sin embargo, tales intervenciones dieron lugar a una homogeneización de las plantas cultivadas, con una pérdida de su variabilidad genética. La preocupación por la drástica reducción de la agrobiodiversidad desencadenó movimientos conservacionistas a favor de la recuperación y conservación de las variedades tradicionales. Pero ¿qué beneficios nos aportan estas variedades? ¿Cuáles son los criterios que deben prevalecer a la hora de recuperarlas? ¿Qué estrategias existen para lograrlo? Con nuestro trabajo en la Fundación Miquel Agustí, científicos de distintas especialidades buscamos ofrecer respuestas a estas preguntas, entre otras. Nuestros estudios, centrados principalmente en la revalorización de variedades tradicionales catalanas singulares, demuestran que es posible diseñar estrategias para conservar la variabilidad genética de las mismas, al tiempo que se promueve la selección de los rasgos que tienen mayor interés tanto para los consumidores como para los productores.

VALOR NUTRITIVO Y SENSORIAL

La especie humana siempre ha buscado en las plantas satisfacer sus necesidades nutritivas, curativas, de materias primas, mágicas, estéticas, etcétera. La domesticación nos ha permitido incrementar fuertemente la producción, y lo hemos conseguido mediante la selección de las mejores variedades, la eliminación de la competencia y el rejuvenecimiento permanente de los ecosistemas agrícolas a través de las labores del suelo, de la gestión de la fertilidad y de los recursos hídricos.

Pero en la vertiente alimentaria, además de la producción, otra propiedad importante para los humanos ha sido el valor sensorial de los productos vegetales, ya que este ha estado vinculado históricamente con sus características nutricionales. A falta de capacidad analítica de laboratorio, los animales hemos aprendido a identificar a través de los sentidos, por ensayo y error, lo que nos conviene nutritivamente. Formas, colores, olores y sabores que reconocemos como atractivos facilitan la identificación de alimentos favorables, del mismo modo que formas, colores, olores y sabores percibidos como desagradables impiden que nos alimentemos de sustancias tóxicas. A estas líneas de preferencia, almacenadas en nuestros genes a lo largo de la evolución, se suman los conocimientos adquiridos en nuestro entorno social, es decir, lo que denominamos preferencias culturales.

La búsqueda de una mayor eficacia en nuestra asociación con las plantas cultivadas tuvo como consecuencia una transforma-

EN SÍNTESIS

Las variedades agrícolas tradicionales son el resultado de siglos de coevolución entre las plantas cultivadas y los humanos, quienes hemos seleccionando las que mejor se adaptaban a las condiciones ambientales y culturales locales.

Sin embargo, desde la revolución verde, muchas de esas variedades han dejado de cultivarse en gran medida o han desaparecido por completo, lo que ha ocasionado una pérdida de la biodiversidad.

Con el fin de revalorizar este patrimonio agrícola y cultural, los expertos proponen varias estrategias de recuperación de variedades tradicionales teniendo en cuenta las exigencias de las sociedades y los agrosistemas del siglo xxi.

PÁGINAS ANTERIORES: MARÍA JOSÉ DÍEZ NICLÓS

ción paulatina del paisaje, y se llegó a los inicios del siglo xx con una gran cantidad de variedades adaptadas a la multitud de culturas y agrosistemas generados desde el Neolítico. Estas variedades, a las que se ha convenido en llamar tradicionales, son el resultado de la colonización por parte de ambos simbiontes, durante 12.000 años, de la enorme diversidad de nichos ecológicos que crea la combinación de los numerosos ambientes de la biosfera junto con la multiplicidad de culturas y cultivadores.

En el siglo xx, el avance de la tecnología agrícola y de la genética, junto con la mayor disponibilidad de energía (por la explotación de los recursos fósiles) y de nutrientes (con la síntesis de nitrógeno a través de la reacción de Haber-Bosch, y la obtención de fósforo y potasio gracias al desarrollo de la industria minera), condujo a la llamada revolución verde. La capacidad de intervenir fuertemente sobre los ambientes edafoclimáticos mediante labores del terreno, abonos, riego, productos fitosanitarios y cultivos protegidos (invernaderos), así como la utilización de maquinaria cada vez más potente, produjo una acción unificadora sobre los ecosistemas agrícolas. La mejora genética científica aceleró la capacidad de obtener genotipos adaptados a estos ambientes que satisfacían el común denominador de las necesidades primarias humanas, principalmente una elevada producción y unas características sensoriales tolerables. Se fue favoreciendo así el cultivo de variedades nuevas, mejoradas genéticamente, a la vez que se hacía un menor uso de las variedades tradicionales, obtenidas a través de siglos de selección y transmisión, lo que contribuyó a una homogeneización de los cultivos y a una pérdida de la agrobiodiversidad.

La percepción de ese cambio empezó a extenderse en todo el mundo y desencadenó movimientos científicos, sociales y políticos, sobre todo a partir de los años 1960, con una creciente toma de consciencia sobre los riesgos asociados a la pérdida de la diversidad genética funcional conservada en las variedades tradicionales. Nuestra especie empezó a conservar semillas con la intención de utilizarlas en caso de necesidad futura. Actualmente, estos materiales, denominados recursos fitogenéticos, se perciben como elementos que trascienden su valor agrícola, para constituirse como objetos culturales.

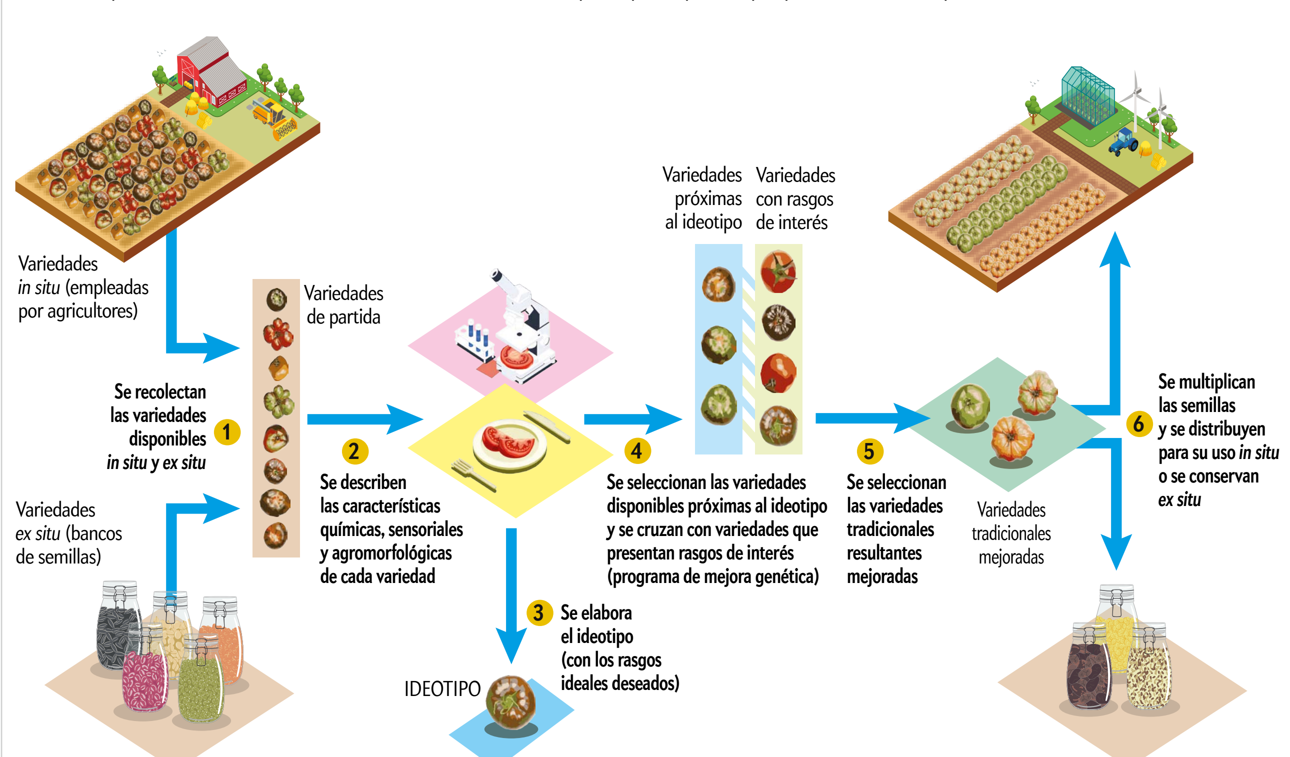
CONSERVAR LA AGROBIODIVERSIDAD

Como resultado de este cambio de paradigma, se han propuesto diversas estrategias para fomentar la preservación de la agrobiodiversidad. Una de ellas es la conservación *ex situ*, que consiste en tomar muestras de semillas o propágulos de las variedades tradicionales, documentar sus características (lugar de cultivo, propiedades agromorfológicas y de aprovechamiento, características genéticas, etcétera) y conservarlas en condiciones adecuadas (baja temperatura y humedad). Se trata de un método costoso, puesto que requiere realizar expediciones de muestreo de semillas (o propágulos) que representen la variabilidad ge-

CONSERVACIÓN Y MEJORA

Cómo revalorizar una variedad tradicional

Los programas de revalorización de una variedad tradicional tienen por objeto la recuperación y mejora de plantas cultivadas locales que han perdido, a través de la erosión genética, propiedades sensoriales y nutritivas de interés. Además de tener en cuenta su viabilidad comercial, se busca la conservación de la variedad no solo en los bancos de semillas (*ex situ*), sino también su cultivo permanente por los agricultores (*in situ*). Abajo se resumen los principales pasos que pueden seguirse para conseguirlo.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, A PARTIR DE UN ORIGINAL DE MANEL LARROSA

nética asociada a los patrones ecogeográficos y culturales, su almacenamiento en los llamados bancos de germoplasma (es decir, recursos genéticos vivos) y su regeneración periódica para mantener la capacidad germinativa. Esta estrategia ha sido la más usada y ha permitido conservar más de 7 millones de muestras en todo el mundo, lo que ha evitado la pérdida definitiva de estas variedades tradicionales. Sin embargo, la escasa caracterización de los materiales conservados hace muy difícil que los agricultores y los mejoradores de plantas puedan localizar los que consideran de interés para el cultivo o los programas de fitomejoramiento. Hemos conseguido recoger y mantener una gran biblioteca, pero desconocemos el título, el índice y la temática de la mayoría de los libros.

Otra estrategia de conservación de germoplasma es la denominada *in situ* u *on farm* (en la explotación), que se basa en salvaguardar las variedades tradicionales a través de su cultivo permanente. Ello significa mantener las variedades en las condiciones ambientales en las que se han desarrollado, lo que implica continuar con las prácticas habituales de los agricultores que las han ido moldeando a lo largo de la historia. Una de las ventajas de esta estrategia es que permite un mantenimiento dinámico de la población vegetal y de los aspectos culturales y de aprovechamiento asociados a ella (epifenotipo). Entre las desventajas figuran la gran superficie de terreno que se necesita para llevarla a cabo y la baja producción del material que se conserva, lo que compromete en muchos casos su viabilidad económica, especialmente en los países más industrializados. Todo ello la convierte en una estrategia más costosa que la anterior.

Nuestro equipo de la Fundación Miquel Agustí tiene como objetivo incrementar la biodiversidad cultivada *in situ*, es decir, la diversidad genética de las variedades utilizadas por los agricultores y que, en última instancia, llegan al consumidor. Para conseguirlo, favorecemos la evolución de las variedades tradicionales empleando los conocimientos cientificotécnicos actuales, a la vez que tenemos en cuenta las preferencias sensoriales de los consumidores. Del mismo modo que la ciencia y la tecnología se usaron para promover la revolución verde y generar variedades mejoradas a partir de las variedades tradicionales, consideramos que ambas pueden utilizarse también para fomentar la conservación *in situ* de la diversidad. Aplicamos los criterios de obtener variedades adaptadas a distintos ambientes y de disminuir los insumos que conllevan la gestión de los cultivos. Buscamos las adaptaciones genéticas a las múltiples condiciones ambientales que se generan cuando reducimos la energía invertida en homogeneizar los ecosistemas agrícolas. Al mismo tiempo, nos esforzamos por recuperar las propiedades que se ajustan a las preferencias sensoriales de los humanos y por fomentar la diversidad cultural gastronómica. La globalización agroalimentaria, que parece irreversible, no debería ser incompatible con una valoración positiva de la diversidad cultural y de las preferencias sensoriales locales.

De resultar exitoso, este enfoque ofrece tres ventajas principales: en primer lugar, se recupera la biodiversidad agrícola y las singularidades gastronómicas de los territorios; en segundo lugar, se incrementa la complejidad de los ecosistemas agrícolas, lo que aumenta su estabilidad y resiliencia; y, por último, se reducen los insumos de origen no renovable, uno de los objetivos fijados a escala planetaria para favorecer la sostenibilidad.

Hemos comentado antes la dificultad de la conservación *in situ* a pesar de las ventajas conceptuales que aporta. Para tener éxito, nos parece que no tiene sentido utilizar las variedades tradicionales tal como eran hace 50 o 100 años, puesto que los humanos hemos cambiado mucho desde entonces (tecnológica y culturalmente), y también ha cambiado el ambiente de cultivo (el clima y la aparición de nuevas plagas, por ejemplo). Antes de defender una estrategia conservacionista en sentido estricto, debemos plantearnos si sigue siendo funcional la relación entre una variedad tradicional antigua y las sociedades y agrosistemas del siglo XXI. Para ilustrar de qué modo podemos abordar ese dilema, nos centraremos en nuestra experiencia con la recuperación de la judía Ganxet.

EL MODELO DE LA JUDÍA GANXET

A principios de la de década de 1990, los clientes que se acercaban a los múltiples restaurantes que existen en Cataluña especializados en la preparación de platos confeccionados con las tradicionales judías Ganxet (con butifarra, con bacalao, con almejas, en tortilla, fritas con panceta, etcétera), quedaban desconcertados por la gran variedad de formas, texturas, olores y sabores de las judías que les servían. Dependiendo del restaurante o la temporada en que las degustaban, el producto iba desde la excelencia hasta la vulgaridad. La relación histórica que esta variedad tradicional mantenía, con un perfil sensorial reconocible, se estaba difuminado al igual que su prestigio. Estábamos asistiendo





FRANCESC CASAÑAS

DE FLOR BLANCA, la judía Ganxet se caracteriza por un elevado grado de curvatura. Esta peculiar morfología está asociada genéticamente a un elevado contenido de proteína y al hecho de que casi no notemos su piel y nos resulte muy cremosa.

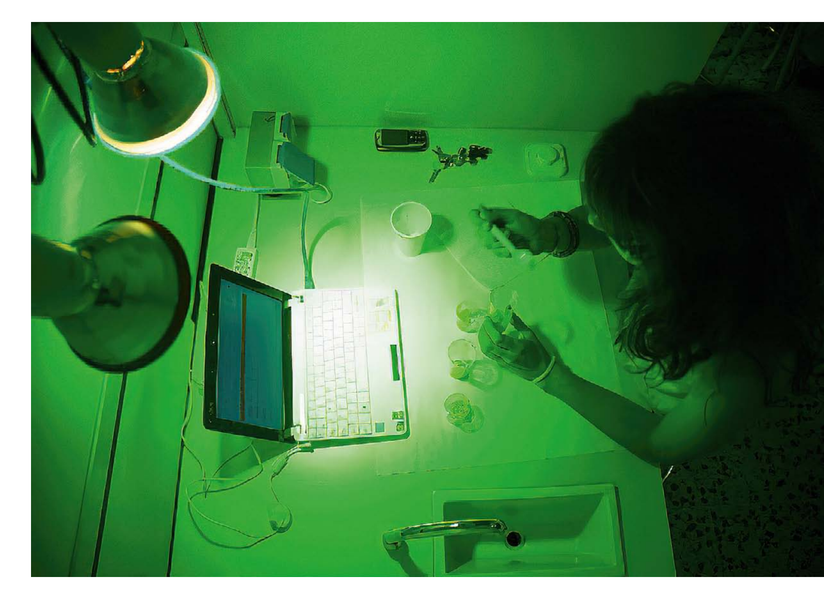
a la dilución de una variedad tradicional que conduciría probablemente con el tiempo a su desaparición, por extinción o por sustitución.

Junto con un grupo de agricultores, nuestro equipo inició una campaña de recogida de semillas para incluir todas las accesiones (variantes) que los productores comercializaban con el nombre de Ganxet. Las encuestas realizadas a productores, consumidores y cocineros, históricamente vinculados a la cocción de esta variedad, permitieron elaborar un ideotipo (conjunto de aspectos deseables de una variedad, que los mejoradores intentan alcanzar) tanto para sus características agromorfológicas como para las sensoriales. En este caso, el ideotipo correspondía a plantas de crecimiento indeterminado (el tallo principal no deja de crecer) y judías de tamaño mediano, blancas, aplanadas, fuertemente arriñonadas (*ganxet* significa «gancho» pequeño en catalán) y, una vez cocidas, de piel casi imperceptible, textura sumamente cremosa y sabor intenso pero poco agresivo. Aparte de ello, esta judía se caracteriza por tener un contenido muy elevado en proteínas. Simultáneamente, recopilamos información, mediante ensayos agronómicos, bibliografía y encuestas en la zona de producción (comarcas litorales y prelitorales del centro de Cataluña), para determinar las condiciones ambientales que contribuían a la calidad de las judías. Estas resultaron ser suelos de *p*H básico y maduración de la semilla en otoño con temperaturas suaves.

A través de nuevos ensayos de campo, determinamos que, de entre las aproximadamente 400 accesiones recogidas, la mayor parte se alejaban del ideotipo. Identificamos poblaciones mixtas de Ganxet con otras variedades de semilla blanca y, sobre todo, mezclas genéticas con variedades mejoradas del tipo comercial Great Northern, que daban como resultado judías más productivas pero sin la característica forma arriñonada. De modo consciente o inconsciente, se estaba produciendo una selección de variedades de alta productividad a partir de cruzamientos espontáneos entre Ganxet y Great Northern, lo que repercutía en un menor valor sensorial de las poblaciones (menos curvatura de la semilla, textura más harinosa, piel más perceptible, menos olor y sabor, menor contenido de proteína). Se mantenía el nombre de la variedad Ganxet, pero se perdían sus atributos de calidad.

Las judías son plantas autógamas (que se multiplican principalmente por autofecundación) y, en consecuencia, sus poblaciones están constituidas por plantas en su mayoría homocigotas (líneas puras). Por ello, nuestra primera labor fue elegir líneas puras en el conjunto de las variantes recopiladas. Escogimos las que se acercaban al máximo al ideotipo sensorial y al mismo tiempo recogían la variabilidad existente para los caracteres agromorfológicos (precocidad, productividad, resistencias a distintos factores de estrés). Como resultado de este proceso, actualmente disponemos de 25 líneas puras que multiplicamos regularmente de forma controlada y ponemos a disposición de los agricultores. A su vez, hemos avanzado en el conocimiento del control genético de la curvatura de la semilla (dos regiones del genoma situadas en cromosomas diferentes) y los efectos de estos genes sobre las propiedades organolépticas y nutritivas (a mayor curvatura, mejor calidad sensorial y mayor contenido proteico).

Todo ello ha permitido conseguir una marca geográfica de calidad europea, la Denominación de Origen Protegida (DOP) «Mongeta del Ganxet» (*mongeta* significa «judía» en catalán), que permite a los consumidores disponer de material garantizado dentro de los límites preestablecidos de la marca. Ahora sí, los consumidores cada vez que degustan judías de esta DOP disfrutan de un material homogéneo y reconocible. A su vez, los productores, además de utilizar el material seleccionado por nuestro grupo, practican sus propias selecciones para conseguir nuevos materiales dentro de los estándares fijados por el reglamento de la DOP.



JOAN SIMÓ

EL ANÁLISIS SENSORIAL de los productos agrícolas, tanto el de los consumidores como el de los catadores entrenados, se realiza en cabinas individuales estandarizadas donde el evaluador dispone de muestras identificadas mediante códigos y de un ordenador donde introduce sus puntuaciones. Para evitar que el color influya en las valoraciones de los otros sentidos de los evaluadores, se utilizan filtros de luz.

Obviamente, las semillas recolectadas durante el proyecto se conservan también *ex situ*, y la información generada en nuestros trabajos se ha publicado en revistas científicas y de divulgación. El resultado final de la intervención ha sido la recuperación del prestigio de la variedad y una exigencia cada vez mayor de los productores, que han entendido los beneficios de una aproximación novedosa a las variedades tradicionales y saben que deben esforzarse por mantener el germoplasma dentro de los cánones de lo que ahora es una marca.

Otros centros de investigación llevan a cabo proyectos con un enfoque similar al nuestro. Entre ellos hay el Instituto Universitario de Conservación y Mejora de la Agrobiodiversidad Valenciana, en Valencia, el Departamento de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad de Tuscia, en Viterbo, y el grupo de Biodiversidad Agrícola y Mejora Genética de Variedades de la Universidad Miguel Hernández, en Elche.

REVALORIZACIÓN COMERCIAL

Los productos obtenidos en sistemas agrícolas de pequeñas dimensiones y bajos insumos, como los que proponemos, son más caros que los procedentes de la agricultura intensiva. Pero hallar razones para defender los precios de mercado más elevados suele ser difícil. En el sector hortícola, un buen argumento es la calidad sensorial, aunque valorarla de forma objetiva suele considerarse una tarea inabordable.

Contrariamente a esta idea, ya en los años 1930 la industria agroalimentaria de EE.UU. empezó a desarrollar metodologías para evaluar las preferencias de los consumidores y asociarlas a atributos sensoriales cuantificables. Al poco tiempo, estas técnicas se emplearon para mejorar las dietas de los soldados

estadounidenses, que habían manifestado quejas respecto a las características sensoriales de sus raciones durante la Segunda Guerra Mundial. Paralelamente se iniciaron análisis descriptivos, en los que grupos de personas entrenadas (paneles de cata) actuaban como instrumento de medida y ofrecían perfiles sensoriales de los productos. La conjunción de los estudios de preferencia con los descriptivos permitió realizar estimaciones cuantitativas sobre las características sensoriales. Consideramos que la aplicación de esta estrategia doble en los programas de revalorización de las variedades tradicionales orienta la mejora genética hacia ideotipos que refuerzan sus características sensoriales distintivas, lo cual afianza la marca que las distingue en el mercado.

Además de dar una respuesta comercial satisfactoria a un producto diferenciable por su valor sensorial, nos interesa aumentar la variabilidad genética, fenotípica y epifenotípica (adaptaciones al ambiente local) de la variedad, así como sus expectativas de utilización. Para medir el impacto de los programas de selección y mejora de variedades tradicionales, nuestro grupo, en colaboración con el Instituto Universitario de Conservación y Mejora de la Agrobiodiversidad Valenciana dirigido por Jaime Prohens, ha desarrollado un índice basado en 20 cuestiones. Su interés radica en la capacidad de cuantificar los aspectos que favorecen el uso de la variedad y, por tanto, complementan la estadística de variedades conservadas *in situ* y *ex situ*.

En los trece casos en los que hemos intervenido, mediante la selección y la evolución dirigida de variedades tradicionales para incrementar su valor sensorial y su adaptación a ambientes locales, hemos conseguido aumentar notablemente el valor de dicho índice. Del mismo modo, nuestras actuaciones han dado lugar a un mayor número de accesiones conservadas *ex situ* y han depurado los materiales que se conservan *in situ*. Los procesos de revalorización han tenido un gran éxito comercial, especialmente en aquellos donde la intervención lleva más años desarrollándose, como el tomate Valenciano y el tomate de Penjar, y en otros para los que se han obtenido marcas geográficas europeas de calidad, como la berenjena de Almagro, la judía Ganxet, la cebolla Blanca Tardana de Lleida («Calçot de Valls»), y la judía Tavella Brisa («Fesols de Santa Pau»).

COMBATIR EL «EFECTO DORITO»

En 1915, el escritor Mark Schatzker, en su libro *The Dorito effect* («El efecto Dorito»), puso de manifiesto la progresiva pérdida de relación entre el sabor de los productos alimentarios y su valor nutritivo. Hoy podemos engañar a nuestros sentidos con un arsenal de olores y sabores sintéticos añadidos a cualquier materia prima. Pero si buscamos productos cuyo elevado valor sensorial se corresponda realmente con un alto valor nutritivo, apostar por las variedades tradicionales evolucionadas parece una estrategia no desdeñable. Ciertamente, dichos valores no son los únicos que pueden interesar. La variabilidad de las variedades tradicionales respecto a la resistencia a factores de estrés bióticos (plagas) y abióticos (calentamiento global, sequías o inundaciones) también ofrece la posibilidad de utilizarlas como punto de partida para seleccionar otros materiales que se desarrollen aceptablemente en esas condiciones con bajos insumos. Por último, si favorecemos la diversificación y el aprovechamiento de las variedades tradicionales, con un retorno a un menor grado de intervención sobre los cultivos, conseguiremos un planeta más sostenible y una biosfera más compleja y estable.

¿Cómo puede realizarse la transición a hacia un sistema agrícola como el descrito? Probablemente durante mucho tiempo todavía necesitemos aplicar la estrategia derivada de la revolución verde, es decir, cultivos generalistas que emplean elevados insumos y variedades mejoradas para su máxima adaptación a las características ambientales específicas. Somos muchos humanos en la Tierra y necesitamos alimentarnos. Pero, a medio y largo plazo, debemos reconsiderar la estrategia de aumentar la biodiversidad cultivada, con cultivos adaptados a condiciones locales y preferencias culturales particulares, derivadas de variedades tradicionales o creadas *de novo* a partir de combinaciones de genes de distintas procedencias. Dichas combinaciones no deben despertarnos extrañeza o rechazo, puesto que el cruzamiento espontáneo entre materiales diversos, junto con las mutaciones, ha sido desde siempre el motor de la evolución agrícola.

Al mismo tiempo, debemos fomentar la participación de los agricultores, los consumidores y los centros de investigación en los procesos de selección y mejora de variedades adaptadas a ambientes y gastronomías locales. La selección participativa de plantas (proceso en el que agricultores, fitomejoradores, técnicos y otros trabajan juntos) o el creciente interés en los programas de ciencia ciudadana constituyen espacios potentes para promover esta estrategia.

Todas las simbiosis evolucionan y no tenemos motivos para pensar que la nuestra con las plantas sea una excepción. Las variedades tradicionales deben coevolucionar con nuestra tecnología y nuestro modo de vivir. Adaptarlas cada vez más a las características ambientales particulares y a las preferencias culturales de los consumidores, a la vez que empleamos insumos mínimos, nos van a permitir mantener el adjetivo «tradicional» para ellas. Conviene recordar que las llamadas variedades mejoradas, que a veces denostamos, son plantas derivadas por mejora genética de antiguas variedades tradicionales, aunque con objetivos de selección distintos a los que acabamos de postular. IyC

PARA SABER MÁS

Toward an evolved concept of landrace. Francesc Casañas et al. en *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, artículo n.º 145, febrero de 2017.
Improving the conservation and use of traditional germplasm through breeding for local adaptation: The case of the Castellfollit del Boix common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landrace. Joan Casals et al. en *Agronomy*, vol. 9, artículo n.º 889, diciembre de 2019.
Participatory plant breeding and the evolution of landraces: A case study in the organic farms of the Collserola Natural Park. Joan Casals, et al. en *Agronomy*, vol. 9, artículo n.º 486, agosto de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mejora del arroz. Yoan Coudert et al. en *IyC*, octubre de 2010.
Frutas y verduras más sabrosas. Ferris Jabr en *IyC*, septiembre de 2014.
Un millón de semillas. Mark Fischetti en *IyC*, septiembre de 2020.
Al rescate del arroz. Debal Deb, *en este mismo número*.

CONSERVACIÓN

Al rescate del arroz



Algunas variedades olvidadas de este cereal básico soportan bien las inundaciones, las sequías y otras adversidades. Pero recuperarlas constituye una empresa difícil

Debal Deb

Fotografías de Zoë Savitz

EN SÍNTESIS

En la India llegaron a existir 110.000 variedades de arroz dotadas de valiosas virtudes, como un alto contenido en nutrientes esenciales y la resistencia a las inundaciones, la sequía, la salinización o las plagas. La revolución verde sembró los arrozales con un puñado de variedades que, aunque muy productivas, desbancaron al 90 por ciento de las demás.

Las variedades de alto rendimiento exigen costosos aportes de abonos, plaguicidas y agua, pero su productividad disminuye notablemente en los terrenos de cultivo marginales o en condiciones adversas, lo que condena al campesino al endeudamiento.

Recolectar, revitalizar y catalogar las variedades locales supervivientes y compartirlas con los arroceros a fin de recuperar una parte de la biodiversidad perdida se ha convertido en la meta del autor.



LAS PANÍCULAS de las diversas variedades de arroz se etiquetan tras la cosecha en la granja de conservación de Basudha.

Un tórrido día del verano de 1991, después de haber recorrido durante horas arboledas sagradas en el sur de Bengala Occidental censando su biodiversidad, me dirigí al humilde hogar de Raghu Murmu para descansar. Este hombre de la tribu santal me invitó a sentarme a la sombra de un mango monumental, mientras su hija me ofrecía agua fresca y dulces de arroz. Saboreaba uno cuando reparé en que su esposa, embarazada, estaba bebiendo un líquido rojizo. Raghu me explicó que era el colado de la cocción de arroz Bhutmuri («cabeza de fantasma»), quizá llamado así por su cáscara oscura. «Repone la sangre de la mujer que ha perdido demasiada durante el embarazo y el parto», me dijo. Averigüé así que el almidón de ese arroz se considera un remedio para la anemia puerperal. Otra variedad, Paramai-sal, que significa «arroz de la longevidad», ayuda a que los niños crezcan sanos, apuntó mi anfitrión.



Debal Deb es el fundador de la granja de conservación arrocera Basudha y del centro de distribución de semillas Vrihi, en Kerandiguda, además de creador y presidente del Centro de Estudios Interdisciplinares de Barrackpore, todos en la India.

Más tarde confirmaría que el Bhutmuri es una de esas variedades originarias del sur de Asia que destacan por su alta concentración en hierro y por contener vitaminas del grupo B. Por su parte, el Paramai-sal es rico en antioxidantes, oligonutrientes y almidón asimilable, fácilmente transformable en energía. Esas variedades poco comunes, de nombres evocadores y con usos medicinales, eran nuevas para mí entonces. Cuando regresé a mi casa en Calcuta, llevé a cabo una búsqueda bibliográfica acerca de la diversidad genética del arroz indio y me di cuenta de la suerte que había tenido de conocer a Raghu. Los campesinos como él, que siembran arroz autóctono y aprecian sus virtudes, están tan amenazados como las mismas variedades.

En los años transcurridos he conocido una verdadera cornucopia de variedades del país dotadas de sorprendentes y variopintas propiedades. Algunas resisten el anegamiento total, la sequía, la salinidad o las plagas; otras son ricas en vitaminas y minerales; y otras más poseen un color, un sabor o un aroma tan apetecibles que se han ganado un lugar eminente en las ceremonias religiosas. Recolectar, multiplicar y compartir con los pequeños arroceros esas variedades, tan raras como valiosas, se ha convertido en el propósito de mi vida.

UN TESORO PERDIDO

El arroz asiático cultivado (*Oryza sativa*) es el fruto de siglos de selección y cruzamiento de especies silvestres ancestrales, un proceso iniciado por los primitivos agricultores del Neolítico que Charles Darwin denominó «selección artificial». Según los datos arqueológicos y genéticos, la subespecie *indica*, a la que pertenece la práctica totalidad del arroz que se cultiva en el subcontinente indio, se sembró por primera vez hace entre 7000 y 9000 años en las estribaciones del Himalaya oriental. En el transcurso de siglos de domesticación y cultivo, los arroceros tradicionales han creado un tesoro oculto de variedades perfectamente adaptadas al suelo, la orografía y el microclima de cada lugar, apropiadas para distintos usos culturales y necesidades nutricionales o incluso medicinales.

Según R. H. Richharia, uno de los pioneros en la investigación de este cereal, hasta los años 70 del pasado siglo en la India se cultivaban más de 140.000 variedades tradicionales. Si excluimos los sinónimos (nombres dados a una misma variedad en distintos lugares), apenas se reducen a las 110.000, una cifra aún ingente. Pero como averigüé con mi búsqueda bibliográfica, la diversidad genética del arroz indio ha caído en picado desde la revolución verde.

A finales de los años 60, el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) proporcionó al Gobierno indio un puñado de variedades de alto rendimiento, que producen enormes cantidades de grano si reciben agua en abundancia, amén de fertilizantes y plaguicidas. En concierto con otros organismos internacionales de desarrollo, el IRRI fomentó la sustitución en los campos de las variedades autóctonas de todo tipo por las importadas. Promocionadas intensamente y a veces impuestas a los agricultores, las recién llegadas desplazaron en poco tiempo a las variedades autóctonas.

A caballo de las décadas de 1970 y 1980, los investigadores del IRRI catalogaron 5556 variedades de Bengala Occidental y recolectaron 3500 para su banco de germoplasma. En 1994, al no encontrar documentación sobre las variedades supervivientes en ese estado, emprendí un largo periplo en solitario. Cuando al fin lo di por acabado en 2006, pude constatar que el 90 por ciento de las variedades registradas entonces había desaparecido de los arrozales. De hecho, es probable que en toda la India ya no se siembren más de 6000. De forma parecida, el Instituto de Investigación del Arroz de Bangladés catalogó los nombres de 12.479 variedades autóctonas entre 1979 y 1981, pero mi análisis publicado en un estudio reciente indica que hoy se cultivan a lo sumo 720 en ese país.

Cuando vislumbré esta alarmante pérdida de biodiversidad en el subcontinente, quedé consternado como biólogo y como ciudadano inquieto. Me pregunté por qué los organismos competentes no parecían preocupados por el deterioro genético del cereal más importante de la región. A fin de cuentas, las consecuencias funestas de la pérdida de variabilidad genética en un cultivo básico deberían estar claras para cualquiera desde la gran hambruna que azotó Irlanda entre 1845 y 1849.

La mayor parte de la patata que se cultivaba en esa isla pertenecía a una sola variedad, Irish lumper, que era vulnerable a *Phytophthora infestans*, el hongo causante del mildiu en este tubérculo. En 1846, la plaga acabó con tres cuartas partes de la cosecha, lo que desató una grave escasez de patatas de siembra durante los años siguientes que tuvo consecuencias terribles. Se calcula que hasta 1,5 millones de irlandeses murieron de inanición y de las enfermedades que esta trajo consigo; durante la década siguiente las privaciones hicieron que cerca de





LA RECUPERACIÓN de las variedades tradicionales exige la siembra, el cuidado y el cosechado de más de un millar de ellas cada año. En estas escenas captadas en Basudha, una agricultora trasplanta el plantel a un campo anegado (*1*) y otro campesino marcha, azadón al hombro, entre los bancales de cultivo (*2*).

1,3 millones emigrasen a Norteamérica y Australia. La lección que ningún agricultor debería olvidar nunca es que la carencia de variedades convierte a cualquier cultivo en vulnerable a las plagas y las infecciones: el monocultivo es desastroso para la seguridad alimentaria a largo plazo. Como resultado de la revolución verde, insectos como el híspido del arroz (*Dicladispa armigera*) o el saltahojas pardo (*Nilaparvata lugens*), que nunca habían supuesto una amenaza importante, han devastado arrozales en varios países asiáticos.

Y es que las vastas extensiones de monocultivos brindan un festín a ciertas plagas. Se intenta acabar con ellas fumigando con profusión, pero con plaguicidas que también exterminan a sus enemigos naturales. De resultas de todo ello se acaba por potenciar la diversidad y la multiplicación de los organismos dañinos. Y es así como se da impulso al círculo vicioso de los plaguicidas. La uniformidad genética de los cultivos —en especial la de las variedades de la revolución verde, seleccionadas primando una mayor productividad— desprovee a las plantas de los caracteres que les permitirían resistir las inclemencias del tiempo, como la lluvia escasa o tardía, las inundaciones estacionales o las marejadas ciclónicas que anegan con agua salada los campos cercanos a la costa. Su fragilidad convierte al agricultor humilde, que a veces no dispone ni del dinero con que comprar una bomba de riego para sus arrozales, en más vulnerable a las impredecibles fluctuaciones ambientales.

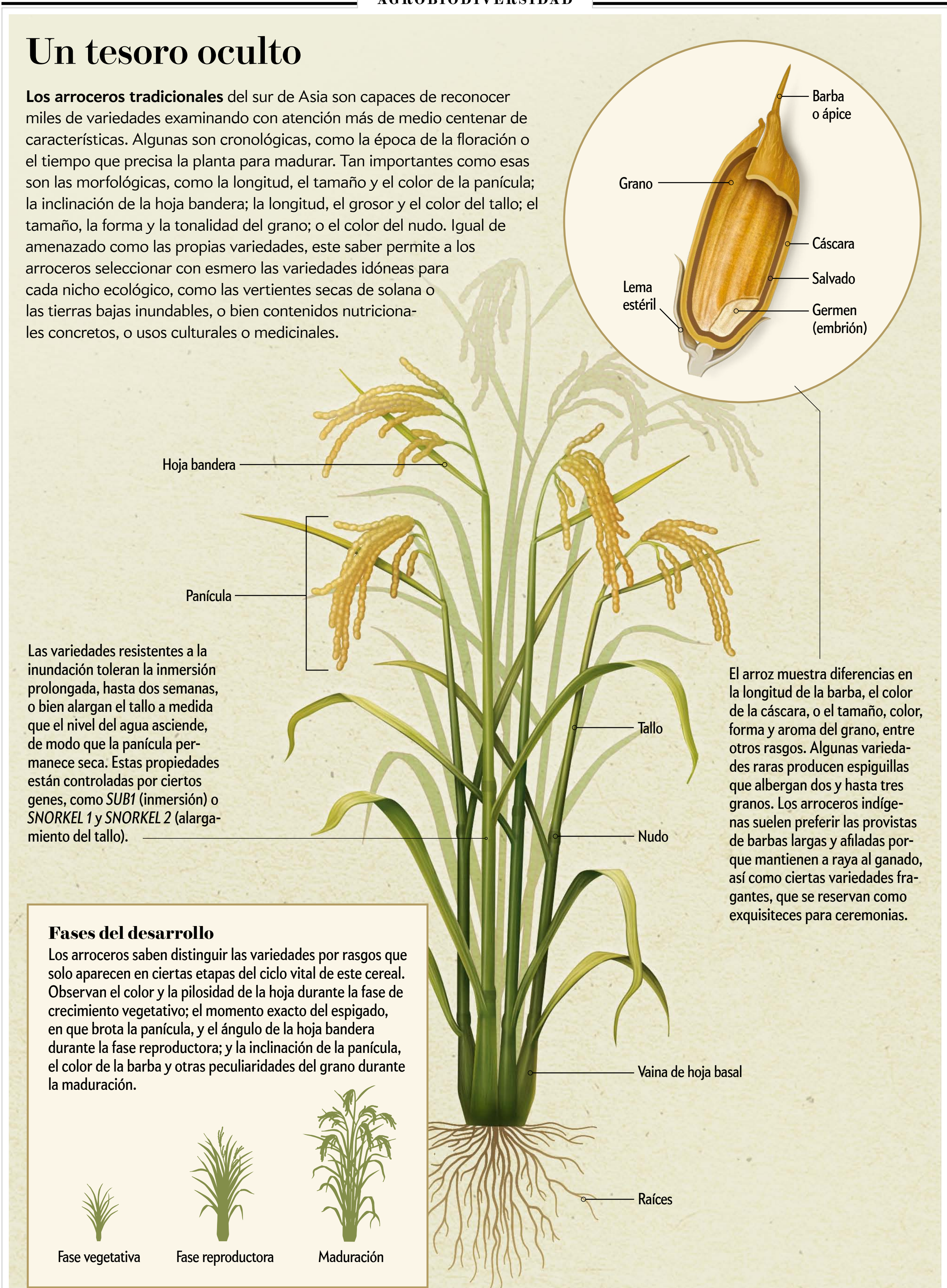
La pérdida de las variedades autóctonas acarrea también la desaparición paulatina de los conocimientos vinculados a su cultivo. Por ejemplo, el arrocero tradicional sabe reconocer una variedad con la mera observación de la época de floración, el color de la vaina de la hoja basal, la inclinación de la hoja bandera, la longitud de la panícula, o el tamaño, el color y la forma del grano [*véase el recuadro*]. Echando mano de esas y otras características, descarta todas las plantas de arroz atípicas o «fuera de tipo» para mantener la pureza genética de la variedad en cuestión. Sin embargo, hoy la inmensa mayoría de los cultivadores del sur de Asia adquieren la simiente a proveedores externos, pues eso ahorra la labor de conservar la pureza del semillero propio. Cuando una variedad local deja de existir, el conocimiento ligado a sus usos agronómicos y culturales se desvanece de la memoria colectiva. Métodos seculares que sacan partido de la biodiversidad para mantener a raya las plagas y las enfermedades ceden paso al asesoramiento de los distribuidores de plaguicidas, a expensas de la calidad del suelo y del agua, de la biodiversidad y de la salud humana.

La revolución verde y, más en general, la modernización de la agricultura también han generado un profundo impacto en el ámbito económico y social. Los costes al alza de los insumos, como las semillas, los abonos, los plaguicidas y el combustible para las bombas de riego, exigen que los arroceros pidan préstamos, a menudo a prestamistas privados. El endeudamiento, sumado a la tendencia a la baja de los precios ofertados por la cosecha, ha sembrado la miseria en los minifundios familiares y ha desatado una ola de suicidios entre los pequeños agricultores de la India. En cambio, en el transcurso de mis décadas de cooperación con agricultores tribales que aún siembran variedades tradicionales de arroz y mijo en sus campos marginales, no he sabido de ni un solo caso de muerte por tal causa.

En 1996 me dirigí con 152 variedades autóctonas de mi colección a la estación de investigación arrocera del Ministerio de Agricultura de Bengala Occidental, donde se supone que conservan como una reliquia todo el germoplasma de este cereal. Lejos de aceptar las semillas que había recolectado para conservarlas, el director me recriminó mi afán por recuperar aquellas variedades del país casi extintas, calificándolo como «retrógrado y falto de toda base científica». El empeño en cultivarlas suponía «volver a la época de las cavernas» y una condena para los arroceros, que vivirían en la miseria con su magra productividad. Cuando le repliqué que ninguna de las variedades de alto rendimiento lograba prosperar en las tierras de secano, ni en las anegadas pertinazmente, ni en los suelos salinos próximos al mar, me aseguró que las técnicas transgénicas pronto aportarían variedades más aptas para esas explotaciones marginales. En definitiva, que dejara el asunto en manos de los agrónomos expertos.

Un tesoro oculto

Los arroceros tradicionales del sur de Asia son capaces de reconocer miles de variedades examinando con atención más de medio centenar de características. Algunas son cronológicas, como la época de la floración o el tiempo que precisa la planta para madurar. Tan importantes como esas son las morfológicas, como la longitud, el tamaño y el color de la panícula; la inclinación de la hoja bandera; la longitud, el grosor y el color del tallo; el tamaño, la forma y la tonalidad del grano; o el color del nudo. Igual de amenazado como las propias variedades, este saber permite a los arroceros seleccionar con esmero las variedades idóneas para cada nicho ecológico, como las vertientes secas de solana o las tierras bajas inundables, o bien contenidos nutricionales concretos, o usos culturales o medicinales.



Las variedades resistentes a la inundación toleran la inmersión prolongada, hasta dos semanas, o bien alargan el tallo a medida que el nivel del agua asciende, de modo que la panícula permanece seca. Estas propiedades están controladas por ciertos genes, como *SUB1* (inmersión) o *SNORKEL 1* y *SNORKEL 2* (alargamiento del tallo).

El arroz muestra diferencias en la longitud de la barba, el color de la cáscara, o el tamaño, color, forma y aroma del grano, entre otros rasgos. Algunas variedades raras producen espiguillas que albergan dos y hasta tres granos. Los arroceros indígenas suelen preferir las provistas de barbas largas y afiladas porque mantienen a raya al ganado, así como ciertas variedades fragantes, que se reservan como exquisiteces para ceremonias.

Fases del desarrollo

Los arroceros saben distinguir las variedades por rasgos que solo aparecen en ciertas etapas del ciclo vital de este cereal. Observan el color y la pilosidad de la hoja durante la fase de crecimiento vegetativo; el momento exacto del espigado, en que brota la panícula, y el ángulo de la hoja bandera durante la fase reproductora; y la inclinación de la panícula, el color de la barba y otras peculiaridades del grano durante la maduración.

REBECCA KONTE

Formado como ecólogo especialista en la organización y el funcionamiento de los ecosistemas, estaba trabajando por entonces con la delegación oriental del Fondo Mundial para la Naturaleza, en la India. En aquella época, esta y otras organizaciones conservacionistas andaban embarcadas en la protección de los grandes animales carismáticos, como el tigre. Las plantas cultivadas no eran «vida silvestre», así que su protección no suscitaba interés. A las instituciones de investigación tampoco les interesaba la conservación de las variedades de cultivos del país, pues no recibirían apoyo económico para ello.

La única alternativa era seguir por mi cuenta, así que dejé mi trabajo en 1996 y me marché a vivir a un pueblo de Bengala Occidental con el propósito de fundar un banco y un centro de intercambio de semillas de arroz. En 1997 lo bauticé Vrihi, «arroz esparcido» en sánscrito. Durante los primeros años invertí mis ahorros y conté con el apoyo decidido de Navdanya, una ONG de Nueva Delhi, para recolectar semillas raras en los confines del país que luego distribuía gratuitamente a los arroceros que las necesitaban. A partir del 2000, las donaciones de amigos y colaboradores pasaron a conformar el grueso de nuestra financiación.

En 1999, mientras llevaba a cabo en el norte de Bengala un censo de biodiversidad para el servicio forestal de ese estado, tuve la oportunidad de explorar los arrozales de la región. Un buen día, después de seis horas de trayecto en autobús y a pie hasta la remota aldea de Lataguri, conseguí una variedad en peligro crítico, llamada Agni-sal. (Califico «en peligro crítico» cualquiera que sea cultivada en una sola granja) Con un grano de vivo color rojo, por el que recibía su nombre (*agni* significa «fuego») y de tallo recio, soportaba bien los temporales. La temporada siguiente entregué las semillas a un campesino que buscaba un arroz adecuado para sus campos, ubicados en tierras elevadas y expuestos a vendavales fuertes. Regresó al cabo de un año con una sonrisa de oreja a oreja, agradecido por la buena cosecha, y eso a pesar de un ciclón que había arrasado los arrozales vecinos. Sin embargo, un año después, un funcionario regional del Ministerio de Agricultura le convenció para que sustituyera el Agni-sal por una variedad de alto rendimiento. Así la perdimos para nuestro banco. Me apresuré a volver a Lataguri para pedirle otra muestra al donante original, solo para saber que había fallecido hacía un año y que su hijo había decidido no sembrarlo más. Por lo que sé, la humanidad ha perdido para siempre el Agni-sal.

Otro incidente ocurrido por entonces me convenció de la necesidad de hacer algo más para recolectar y repartir las semillas. Los agricultores de las tierras bajas de la India solían sembrar dos tipos de arroz tolerantes a las inundaciones. Uno crece más y más alto a medida que las aguas ascienden. Ese alargamiento del tallo sumergido, controlado por los genes *SNORKEL 1* y *SNORKEL 2*, radicados en el cromosoma 12, es común en variedades tradicionales como Lakshmi dighal, Jabrah, Pantara y Rani kajal. La segunda de ellas resiste la inmersión prolongada durante las crecidas. Uno de los genes que controla esa tolerancia es el *SUB1*, presente en algunas variedades de Bengala.

En junio de 1999, un distrito del sur de Bengala Occidental sufrió una inundación repentina. Todos los arrozales se perdieron. No disponía entonces en mi banco de variedades que tolerasen el anegamiento total, pero sabía que el IRRI y la Oficina Nacional de Recursos Genéticos Vegetales de Nueva Delhi sí contaban con varias docenas. Así que escribí a ambas instituciones solicitando el envío de 10 o 20 gramos de simiente para acudir en ayuda de aquellos arroceros en apuros. No recibí respuesta alguna. Si una persona instruida, que se dirigía en una lengua europea y en cuyo membrete figuraban sus títulos académicos y sus afiliaciones profesionales, no merecía una respuesta de los bancos de germoplasma nacionales e internacionales, no cuesta imaginar qué posibilidades tendría un agricultor pobre de Kenia o de Bangladés de recibir unas muestras. A menos que me corrijan, ningún campesino del país ha recibido una sola semilla de estos bancos de germoplasma *ex situ*, a pesar de que han engrosado sus fondos gracias a las aportaciones de la gente del campo.

En cambio, abren las puertas a las empresas privadas de semillas y a sus programas de hibridación que culminan en patentes. Un cálculo del Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI) señaló que, en 1996, cerca de tres cuartas partes de los arrozales de EE.UU. habían sido sembrados con semillas descendientes de la colección del IRRI. Y en 1997, la Oficina de Patentes y Marcas Registradas de EE.UU. concedió a la empresa RiceTec, con sede en Texas, los derechos de patente más amplios nunca vistos a un arroz indígena, un híbrido de basmati cuyos progenitores procedían del sur de Asia y se obtuvieron de la colección del IRRI. Este instituto, que supuestamente custodia su fondo en beneficio de todos los agricultores del mundo, presentó en 2014 una solicitud de patente internacional para un gen mejorador del rendimiento llamado *SPIKE*, descubierto en la variedad indonesia Daringan.

Los bancos de semillas *ex situ* no solo están física y socialmente alejados del campesino, sino que el aislamiento prolongado que sufren las semillas resulta perjudicial. El arroz deshidratado y conservado a –20 °C mantiene su capacidad germinativa hasta 35 años. Pero congelado tanto tiempo, queda separado de las formas de vida que evolucionan sin cesar en el exterior. Cuando se siembra al cabo de tantos años, ha perdido cualquier resistencia intrínseca a ciertos patógenos, que en el lapso transcurrido han evolucionado hasta convertirse en cepas nuevas. En cambio, las simientes de los campesinos, auténticos bancos conservados a pie de campo, forzosamente de bajo coste, se han de sembrar cada año, pues de lo contrario existe el riesgo de que buena parte no germine. Gracias a ese imperativo, las semillas así conservadas siguen evolucionando en paralelo con los patógenos y las plagas.

Después de una serie de experiencias y observaciones en ese sentido, tomé la decisión de fundar una granja de conservación por mi cuenta, en la que mantendría un pequeño remanente de cada variedad autóctona aunque fuese abandonada por la mayoría de los cultivadores. Así que, con los ahorros de una estancia posdoctoral en la Universidad de California en Berkeley, fundé en 2001 la granja Basudha. Vrihi es hoy el mayor banco de germoplasma de acceso público en el sur de Asia, con 1420 variedades de arroz que se cultivan cada año en la granja de Basudha, ubicada en una aldea rural al sur de Odisha. De las variedades conservadas en el banco, 182 no se cultivan ya en los arrozales indios.

Con menos de 0,7 hectáreas a nuestra disposición, nos vemos obligados a cultivar 64 plantas de cada variedad en escasos cuatro metros cuadrados de tierra (el mínimo imprescindible para preservar la dotación genética de una variedad ronda el medio centenar de individuos). Como no podemos cumplir la distancia de aislamiento recomendada a escala internacional, de al menos 110 metros a ambos lados de cada variedad, evitar la polinización cruzada entre las variedades colindantes supone un quebradero de cabeza. Nos las hemos apañado para resolver el problema plantando juntas variedades que florecen en momentos distintos. Además, en distintas etapas vitales, expurgamos

las plantas fuera de tipo de cada población mediante el examen de 56 características, como aconsejan las directrices de Bioversity International. Cumplido este paso, suponemos que todas las semillas recolectadas son genéticamente puras al cien por cien, a excepción de algunas mutaciones que inevitablemente pasan inadvertidas.


1

En la granja de Basudha todas las variedades autóctonas de arroz se cultivan de acuerdo con el principio agroecológico de «cero aportes externos», es decir, sin productos agroquímicos ni aguas subterráneas ni combustibles fósiles. El aporte de nutrientes queda asegurado por medio de un acolchado de hojas y paja, cultivos de cobertura a base de leguminosas (cuyas raíces son ricas en bacterias que fijan el nitrógeno atmosférico), compostaje de restos de hortalizas y estiércol, carbón vegetal ecológico y microbios del suelo. Las plagas se mantienen bajo control fomentando el crecimiento de «malas» hierbas y arbustos que ofrecen cobijo a depredadores como arañas, hormigas y reptiles, así como a parásitos. Otra estrategia consiste en mantener estanques y charcas como criaderos para insectos acuáticos y anfibios, que devoran las plagas. De vez en cuando también aplicamos repelentes vegetales, como extractos de tabaco, ajo o albahaca morada (*Ocimum sanctum*). Las enfermedades nunca han supuesto un problema en Basudha: es cosa probada que la diversidad específica y varietal constituye la mejor estrategia contra los patógenos vegetales.

Una parte de la simiente la guardamos para la siguiente temporada de siembra en tarros de arcilla, donde están a buen recaudo de insectos y roedores y al mismo tiempo pueden «respirar». La parte restante la repartimos a cambio de un puñado de semillas de otras variedades locales, que cultivamos y donamos a su vez a otros cultivadores. Es, en efecto, un intento premeditado por recuperar la vieja costumbre del trueque de semillas, común a todas las comunidades agrícolas y que antaño contribuyó a difundir las variedades cultivadas en los cinco continentes.

Junto con mis colaboradores hemos ayudado a crear más de 20 bancos en otras partes del país para que los agricultores de esos lugares no tengan que viajar hasta Vrihi para conseguir las simientes. También fomentamos las redes de intercambio entre los arroceros. Esos bancos y redes han beneficiado a más de 7800 campesinos de cinco estados del país. Además, consignamos los caracteres y las propiedades de cada variedad y registramos legalmente las variedades en su nombre para evitar cualquier acto de biopiratería en forma de patente. Con esos medios, pretendemos devolverles la soberanía sobre sus semillas, algo esencial para garantizar su seguridad económica y alimentaria a la larga.

UN CUERNO DE LA ABUNDANCIA

En los minifundios precarios que sufren los estragos de la sequía y de las crecidas estacionales, las variedades tradicionales constituyen el único medio fiable para dotar de una provisión segura de alimento a los agricultores más humildes. Después de 22 años dedicados al cultivo de esas variedades confío en que, en condiciones de sequía, Kelas, Rangi, Gadaba, Kaya y Velchi brinden mayores rendimientos que cualquiera de las modernas variedades de alta productividad; que Lakshmi dighal, Rani kajal y Jabra alarguen el tallo a medida que las aguas asciendan, hasta los cuatro metros de altura, y mantengan las panículas rebosantes de semillas por encima de ellas; y que Matla, Getu, Talmugur y Kallurundai crezcan en suelos salinos y sobrevivan a las incursiones del agua marina. Todas ellas son líneas germinales estables, dotadas de una serie de genes que confieren una amplia plasticidad adaptativa.

Es más, dadas las óptimas condiciones que ofrece el suelo de los arrozales regados con la lluvia, muchas superan en rendimiento a las variedades modernas. Puedo citar, por ejemplo, Bahurupi, Bourani, Kerala sundari y Nagra. Entre las sumamente raras que brindan un rendimiento bastante notable figuran las de grano doble o triple, que serían el resultado de la selección de mutaciones muy infrecuentes en los genes estructurales de la flor. Basudha es al parecer el último lugar donde se conserva una de esas variedades triples, denominada Sateen.

Otras son igualmente resistentes a las plagas y los patógenos. Kalo nunia, Kalanamak, Kartik-sal y Tulsi manjari lo son al añublo; Bishnubhog y Rani kajal al tizón bacteriano. Kataribhog es moderadamente resistente al virus del tungro. Gour-Nitai, Jashua y Shatia parecen resistir los ataques de la oruga del estuche (*Nymphula depunctalis*) y las variedades Khudi khasa, Loha gorah, Malabati, Sada Dhepa y Sindur mukhi raramente resultan atacadas por los barrenadores del tallo. Todas esas semillas, distribuidas desde Vrihi, han reducido las pérdidas causadas por las plagas y otros males en millares de arrozales durante el último cuarto o mitad de siglo.

El mejoramiento actual del arroz persigue ante todo aumentar el rendimiento del grano, pero numerosas variedades locales contienen oligonutrientes ausentes en los cultivares modernos. En estudios recientes de factura propia hemos descubierto no menos de 80 variedades que aportan más de 20 miligramos de hierro por kilogramo de arroz, con las concentraciones máximas registradas en las Harin kajli, Dudhé bolta y Jhuli, que van de 131 a 140 miligramos por kilogramo. Compárense esos valores con los 9,8 miligramos del IR68144-2B-2-2-3 transgénico, rico en ese elemento y desarrollado en el IRRI con un coste desorbitado.

Algunas variedades del país podrían tener asimismo aplicaciones en salud. La medicina tradicional de la India, el ayurveda, aconseja el arroz Nyavara de Kerala como remedio para ciertos trastornos neurológicos. Junto con mis colaboradores, estoy estudiando su composición bioquímica y espero someter a prueba su eficacia en esa indicación. Otro arroz medicinal, el Garib-sal de Bengala Occidental, se prescribía contra las in-



JUNTO A SU COLABORADOR Debdulal Bhattacharya, Debal Deb examina con atención, anota (*1*) y comenta (*2*) las características del grano cosechado.

fecciones digestivas. En un artículo publicado en 2017 en *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, mi equipo verificó la bioacumulación de plata en granos de Garib-sal hasta una concentración de 15 partes por millón. Las nanopartículas de este metal precioso matan las bacterias, según un estudio de 2017 de *Chemistry Letters*, por lo que tomarlo ayudaría a combatir los patógenos intestinales. Un sinfín de esas variedades supuestamente medicinales aguarda a ser estudiado en el laboratorio y en estudios clínicos.

La estética es otro más de los valores apreciados por los arroceros del país, quienes cultivan ciertos tipos simplemente por la belleza del color o de la forma: estrías doradas, pardas, violetas y negras sobre cáscaras amarillas, ápices morados, barbas negras, etcétera. Muchos habitantes del este de la India se sienten orgullosos de las extensiones aladas que semejan las lemas estériles de los arroces Moynatundi y Ramigali. Las variedades aromáticas son protagonistas de ceremonias religiosas y de festivales en todas las culturas que cultivan este cereal. Cuando esos tipos desaparecen de los campos, multitud de exquisiteces culinarias se pierden para siempre y el significado cultural y simbólico de las ceremonias se desvirtúa. La colección de Basudha, que alberga 195 variedades fragantes, ha ayudado a revivir culturas alimentarias locales y ceremonias tradicionales en declive.

La complejidad de las interacciones ecológicas ha propiciado la aparición de otro conjunto de variedades arroceras. Los pequeños cultivadores de Bengala Occidental y Jharkhand prefieren las provistas de barbas largas y rígidas (proyecciones espinosas que brotan del extremo de la cáscara), porque disuaden a las vacas y a las cabras. También aquellas cuyas hojas bandera son erectas, pues esto impide que las aves granívoras se posen en ellas y accedan con facilidad al grano.

Curiosamente, algunos arroceros de Odisha alternan al mismo tiempo en sus campos variedades con y sin barbas, aunque ello no reporte ninguna ventaja aparente. Otras variedades raras lucen hojas y tallos morados sin ninguna utilidad manifiesta. Tal es la relevancia que las tradiciones del sur de Asia parecen atribuir a la biodiversidad en la agricultura, tanto a nivel genético como específico, que la han incorporado en ciertos rituales religiosos. Por ejemplo, algunas especies silvestres parientes del arroz cultivado, como el buno dhan (*Oryza rufipogon*) y el uri dhan (*Hygroryza asiatica*), forman parte de ritos del hinduismo y se mantienen en muchas explotaciones de Bengala Occidental y del estado vecino, Jharkhand. Esos reservorios de genes silvestres están adquiriendo cada vez más importancia como fuente de rasgos inusuales, susceptibles de ser incorporados a los cultivares existentes, según dicte la necesidad. Además, la presencia en los arrozales de ciertos árboles, como la margosa (*Azadirachta indica*), cuyas hojas actúan como un plaguicida natural, o de depredadores, como los búhos y las lechuzas, es considerada como señal de buen augurio.

AL RESCATE DE LOS ARROCEROS

Ante el fracaso de la ciencia agrícola moderna para suministrar a los agricultores de las tierras marginales líneas germinales de arroz que sean dignas de confianza, nuestra mejor baza radica en una gran colección de variedades autóctonas, con sus refinadas adaptaciones a las condiciones adversas. Convencidos por la mayor estabilidad productiva de tales variedades, más de 2000 arroceros de los estados de Odisha, Andhra Pradesh, Bengala Occidental, Karnataka, Kerala y Maharashtra han adoptado arroces conservados en Vrihi y han abandonado los tipos de alto rendimiento.

Cuando el ciclón Aila azotó en mayo de 2009 la costa del Sundarbans, en Bengala Occidental y Bangladés, causó cerca de 350 muertos y destruyó los hogares de más de un millón de personas. La marejada que lo acompañó anegó y cubrió de sal los campos cercanos a la costa, por lo que además de la devastación inmediata, la provisión de alimento quedó en serio peligro durante bastante tiempo. Distribuimos entre unos pocos arroceros de los pueblos isleños del Sundarbans pequeñas cantidades de semillas del banco de Vrihi, pertenecientes a variedades tolerantes a la sal, como Lal Getu, Nona bokra o Talmugur. Durante aquella temporada calamitosa fueron las únicas que rindieron una cantidad apreciable de grano en los campos salinizados. De modo similar, en 1999 fueron variedades locales como Jabra, Rani kajal y Lakshmi dighal las que salvaron la cosecha en el sur de Bengala después de la crecida del río Hugli. En 2010, Bhutmuri, Kalo gorah, Kelas y Rangi salvaron a muchos agricultores del distrito occidental de Puruliya de las consecuencias de una grave sequía motivada por el retraso de las lluvias monzónicas.

Esos desastres demuestran, una y otra vez, que la sostenibilidad a largo plazo del cultivo del arroz depende esencialmente de la recuperación de las prácticas agrícolas tradicionales, basadas en la biodiversidad y en la siembra de una amplia gama de variedades que han logrado resistir el embate de la agricultura industrial. IyC

PARA SABER MÁS

Beyond developmentality: constructing inclusive freedom and sustainability. Debal Deb. Earthscan, 2009.
Rice: origin, antiquity and history. Editado por S. D. Sharma. CRC Press, 2010.
The imperial roots of hunger. Madhusree Mukerjee en *Himal Southasian*, vol. 26, n.º 2, págs. 12-25, abril de 2013.
A profile of heavy metals in rice (*Oryza sativa* ssp. *indica*) Landraces. Debal Deb et al. en *Current Science*, vol. 109, n.º 3, págs. 407-409, 10 de agosto de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mejora del arroz. Yoan Coudert et al. en *IyC*, octubre de 2010.
Cultivos resistentes a la sal. Mark Harris en *IyC*, septiembre de 2013.
La conservación de la biodiversidad cultivada. Francesc Casañas, Joan Simó y Joan Casals, *en este mismo número*.

SOCIOLOGÍA

LA PANDEMIA QUE

La gripe de 1918 acabó con la vida de millones de personas, pero luego desapareció de la memoria colectiva. ¿Ocurrirá lo mismo con la COVID-19?

Scott Hershberger



EN 1924, LA *ENCICLOPEDIA BRITÁNICA* PUBLICÓ UNA HISTORIA DEL SIGLO XX HASTA ESE momento, con capítulos firmados por más de 80 autores, desde políticos y profesores hasta soldados y científicos. Pero las 1300 páginas de esa vasta obra, titulada *These eventful years: The twentieth century in the making as told by many of its makers*, no hacen referencia a la catastrófica pandemia de gripe que había matado a entre 50 y 100 millones de personas en todo el mundo tan solo cinco años antes. Muchos libros de historia publicados en décadas posteriores no mencionan la pandemia de gripe de 1918-1919, o lo hacen solo de pasada al hablar de la Primera Guerra Mundial.



CAMP FUNSTON, un centro de entrenamiento militar de la Primera Guerra Mundial situado en Kansas, fue el epicentro de uno de los primeros brotes de la gripe de 1918 en EE.UU.

ALAMY

Por extraño que parezca, hasta hace poco esa pandemia había quedado relegada en la memoria pública. Hay monumentos y días festivos para conmemorar a los caídos en las dos guerras mundiales, y museos y películas que relatan el hundimiento del *Titanic* o las misiones Apolo a la Luna, pero no ocurre lo mismo con la gripe de 1918 —a menudo llamada «gripe española», debido a creencias erróneas sobre su origen—. Esa tragedia constituye una parte desproporcionadamente pequeña del relato sobre nuestro pasado.

Que tamaña calamidad haya podido desvanecerse de nuestra memoria colectiva es algo que asombra a Guy Beiner, historiador de la Universidad Ben Gurión del Néguev, en Israel. «Tenemos la idea equivocada», explica, «de que es inevitable recordar los sucesos de mayor relevancia histórica, aquellos que afectan a muchísima gente, cambian el devenir de las naciones o causan una gran mortandad. Pero las cosas no funcionan así».

Beiner comenzó a coleccionar libros sobre la pandemia de 1918 hace veinte años. Al principio llegaban con cuentagotas, pero ahora no da abasto. «En mi despacho tengo tres pilas [de novelas] esperándome, tres montañas», afirma. La gripe de 1918, que era un tema muy especializado incluso entre los historiadores, se compara ahora con la COVID-19 en cuanto a la tasa de mortalidad, las repercusiones económicas o la eficacia de las mascarillas y el distanciamiento social. Y la correspondiente entrada

Scott Hershberger es periodista científico. Estudió física y matemáticas en la Universidad Washington de San Luis.



de la Wikipedia en inglés («*Spanish flu*») recibió más de 8,2 millones de visitas solo en marzo, pulverizando el récord mensual previo a 2020, de 144.000 consultas, que se había alcanzado en 2018, durante el centenario de la pandemia.

El olvido y redescubrimiento de la gripe de 1918 abre una ventana a la ciencia de la memoria colectiva y ofrece pistas sobre la visión de la pandemia actual que tendrán las futuras generaciones.

¿QUÉ ES LA MEMORIA COLECTIVA?

El estudio de la memoria colectiva, iniciado a principios del siglo xx por el sociólogo Maurice Halbwachs, concita mucho interés últimamente en las ciencias sociales. Henry L. Roediger III, psicólogo de la Universidad Washington de San Luis, define la memoria colectiva como «el recuerdo que tenemos de nosotros mismos como parte de un grupo [...] que conforma nuestra identidad». Las naciones, los partidos políticos, las comunidades religiosas y las peñas deportivas, ahonda Roediger, entretejen los eventos de su pasado común en una narración que refuerza un sentimiento de identidad compartido.

Los investigadores a menudo usan métodos de evocación libre para estudiar la memoria colectiva de acontecimientos históricos bien conocidos. Por ejemplo, Roediger y varios colaboradores, incluido James Wertsch, también de la Universidad Washington de San Luis, pidieron a ciudadanos estadounidenses y rusos que nombraran los diez sucesos más importantes de la Segunda Guerra Mundial. Los americanos mencionaron sobre todo el ataque de Pearl Harbor, el lanzamiento de las bombas atómicas sobre Japón y el Holocausto, mientras que la mayoría de los rusos citaron la batalla de Stalingrado, la batalla de Kursk y el sitio de Leningrado. El único episodio presente en ambas listas era el desembarco de Normandía, que en Rusia se conoce como la «apertura del segundo frente». Según los investigadores, los incidentes que los encuestados recordaban con mayor viveza reflejan el esquema o marco narrativo de su país para recordar el pasado.

Un estudio de ese tipo podría revelar qué detalles de la gripe de 1918 conoce la gente, pero «que yo sepa, nadie lo ha hecho», apunta Wertsch. «Llevar a cabo una encuesta sería inútil.» Casi nadie es capaz de citar datos relevantes sobre aquella pandemia, ni siquiera a la hora de compararla con la COVID-19. Wertsch subraya que la memoria colectiva parece depender mucho de los relatos que tienen un principio, un desarrollo y un final claros. «Si hay un instrumento cognitivo universal y natural, es la narrativa», añade. «No todas las culturas humanas poseen sistemas aritméticos, y menos aún técnicas de cálculo, pero todas cuentan historias.»

A los países que participaron en la Primera Guerra Mundial, la contienda les proporcionó un arco narrativo diáfano, repleto de héroes y villanos, de victorias y derrotas. En cambio, un enemigo invisible como la gripe de 1918 no responde a una estructura narrativa lógica: aquella epidemia no tuvo un origen claro, se ensañó con personas sanas en sucesivas olas y se escabulló sin que lográramos entenderla. Los científicos de la época ni siquiera sabían que el patógeno era un virus y no una bacteria. «Los médicos estaban avergonzados», afirma Beiner. «Fue un fracaso estrepitoso de la medicina moderna.» Sin un esquema narrativo que la afianzase, la pandemia desapareció casi por completo del discurso público al poco de acabar.

A diferencia de la gripe de 1918, la COVID-19 no compite por nuestros recuerdos con ningún conflicto bélico a gran escala. Y el conocimiento científico de los virus ha mejorado de manera espectacular en el último siglo. Sin embargo, hay aspectos que no han cambiado tanto desde la pandemia de nuestros antepasados. «Aunque el experimento del confinamiento sea inédito en cuanto a su magnitud y severidad, nuestros planteamientos son los mismos que hace cien años», sostiene Laura Spinney, autora de *El jinete pálido. 1918: La epidemia que cambió el mundo* [*véase una reseña de este libro en* «Una guerra vírica mundial», por Tilli Tansey; Investigación y Ciencia, junio de 2018]. «Mientras no dispongamos de una vacuna, el distanciamiento social es nuestra principal medida de protección, igual que lo fue entonces.» La polémica que suscitan las mascarillas también tiene un precedente: en 1919, casi dos mil personas asistieron a una reunión de la Liga Antimascarillas de San Francisco.

No se ha investigado demasiado sobre cómo afecta la polarización política a la formación de recuerdos colectivos. Roediger y Wertsch intuyen que la división intensifica el recuerdo que guarda cada persona de un acontecimiento, pero Wertsch cuestiona que ese efecto vaya a influir en la memoria colectiva de la pandemia actual. «El virus no es el personaje ideal para una narración prototípica», incide.

Tampoco es probable que la carrera por desarrollar y distribuir una vacuna se traduzca en un relato potente, según Wertsch. «Puede que presenciemos la aparición de un héroe científico, como Louis Pasteur en el siglo xix», augura, «pero cabe destacar que nuestro recuerdo de él se circunscribe a la persona, no a ninguna epidemia en concreto». No obstante, con una historia potente o sin ella, la COVID-19 quedará mucho mejor documentada que la pandemia de gripe de hace cien años. ¿Podría ser que la exhaustiva cobertura mediática sirviese para consolidar la memoria colectiva?

EN SÍNTESIS

Una vez concluida, la gripe de 1918 desapareció casi por completo de nuestra memoria colectiva, aunque resurge con fuerza con cada nueva pandemia de gripe.

Tomar conciencia de dicho olvido podría ayudar a consolidar nuestra memoria de la COVID-19, una pandemia que también quedará mucho mejor documentada.

Pero la memoria colectiva parece requerir que los sucesos posean un esquema narrativo claro y experimenta altibajos según el contexto social del momento. El desenlace de la pandemia actual podría determinar cuánto la recordaremos.

LA PRENSA Y EL IMAGINARIO COLECTIVO

Los periódicos y revistas de la época sí que cubrieron ampliamente la gripe de 1918 mientras aún causaba estragos. Meg Spratt, profesora de comunicación en la Universidad de Washington, señala que en el tratamiento informativo que se hizo en Estados Unidos predominaba el lenguaje «biomilitar». Muchas crónicas presentaban la situación como una batalla entre el ser humano (sobre todo los funcionarios públicos) y la enfermedad, pero se habló «muy poco de las experiencias de las víctimas y los supervivientes», asegura Spratt. El foco recayó sobre expertos y figuras de autoridad, casi exclusivamente varones blancos. Spratt también ve indicios de que la Primera Guerra Mundial eclipsó la pandemia: según expone en un artículo de 2001, «cuando las defunciones por la gripe superaron las causadas por la guerra, durante el otoño de 1918, el *New York Times* relegó esa información a una pequeña nota en sus páginas interiores».

Spratt ve paralelismos entre la cobertura mediática de la gripe de 1918 y la de la COVID-19. «El foco sigue recayendo sobre los expertos en salud pública que intentan pergeñar normas y recomendaciones para proteger a la población», observa. «Aunque hoy en día parece haber una amplificación, que podría deberse en parte a los nuevos medios tecnológicos.» Dado que Internet y las redes sociales permiten que el ciudadano de a pie documente públicamente su vida durante la pandemia, «habrá más material que refleje lo que se vivió realmente», argumenta Spratt. De esta manera, los medios están componiendo una imagen más completa de la pandemia actual, desde los testimonios de primera mano de los trabajadores esenciales hasta los reportajes sobre el efecto de las diferencias socioeconómicas y raciales en la incidencia de la COVID-19.

Las fotografías también podrían ayudar a cimentar la memoria colectiva de la COVID-19. Los estudios en psicología demuestran que nos resulta mucho más fácil recordar imágenes que palabras o ideas abstractas. Por eso, las instantáneas más difundidas pueden convertirse en el eje vertebrador del recuerdo colectivo, sostiene Roediger. La historia abunda en imágenes icónicas de ese tipo: los soldados estadounidenses plantando la bandera en Iwo Jima; las torres gemelas de Nueva York derrumbándose el 11 de septiembre de 2001; el jugador de fútbol americano Colin Kaepernick hincando una rodilla en el suelo mientras suena el himno nacional de EE.UU. «Pero las cámaras no suelen acceder a la habitación de los enfermos o a los hospitales», advierte Spinney. «Tendemos a no invadir ese espacio.» Hay pocas imágenes de los espantosos síntomas que provocó la gripe de 1918, como la coloración azulada de la cara o las hemorragias auriculares. Y en las noticias actuales sobre la saturación de los hospitales, la falta de equipos de protección individual y la elevada mortalidad en las residencias geriátricas también escasean las fotografías impactantes que podrían apuntalar nuestra memoria colectiva.

Incluso si no se generan imágenes icónicas, la gente recordará cómo les afectó la COVID-19 a ellos y a su familia. Lo mismo ocurrió con la gripe de 1918: en 1974, el historiador Richard Collier publicó un libro donde recogía las experiencias de más de 1700 personas de todo el mundo. Pero, como han constatado los historiadores, la memoria colectiva experimenta altibajos en función del contexto social de la época.

CICLOS DE MEMORIA Y OLVIDO

Esta no es la primera vez que una pandemia nos lleva a reexaminar la gripe de 1918. En el siglo XX hubo otras dos pandemias de gripe, en 1957 y 1968. En ambos casos, «de repente resurge la memoria de la gran gripe», apunta Beiner. «La gente vuelve la mirada a aquel precedente, trata de hallar una cura.» Del mismo modo, las búsquedas en Google sobre la «gripe española» se dispararon en todo el mundo durante los brotes de gripe aviar en 2005 y de gripe porcina en 2009, aunque ambos picos se han visto superados por el que tuvo lugar en marzo de este año. Mientras tanto, se han multiplicado las investigaciones historiográficas sobre la gripe de 1918, lo que ha sentado las bases para el resurgimiento de su recuerdo en la esfera pública.

Beiner cree que la crisis actual cambiará el modo en que nuestra sociedad recuerda la pandemia de 1918. Entre los libros que ha reunido sobre el tema, «ninguno se ha convertido en la gran novela, ese libro que todo el mundo lee. Creo que eso podría cambiar ahora». Beiner vaticina que la COVID-19 inspirará una novela superventas o una película de éxito en torno a la gripe de 1918. Este tipo de referencias culturales ayudarían a trabar el discurso público sobre aquella pandemia, intensificando la presente ola de recuerdo social. En lo que concierne a la COVID-19, Beiner prevé que también «irá apareciendo y desapareciendo de la memoria» en las próximas décadas y señala que «el relato será complicado».

Consolidar la memoria colectiva de la gripe de 1918 también podría contribuir a crear el esquema narrativo necesario para mantener la COVID-19 en el pensamiento público una vez que acabe. Si instauramos museos, monumentos o conmemoraciones, conformarán un marco social para seguir discutiendo la crisis sanitaria actual. De hecho, la Sociedad de Historia de Nueva York ya está recopilando objetos relacionados con la COVID-19 para exponerlos en el futuro. «Creo que esta vez el impacto será mucho mayor, porque ahora somos conscientes de que no nos acordábamos de la gripe de 1918, en un sentido público», valora José Sobral, antropólogo social de la Universidad de Lisboa.

Wertsch no lo ve tan claro. «En unos pocos años», asegura, «quizás hayamos olvidado todo esto». Sospecha que la forma en que termine la pandemia del coronavirus (y si viene seguida de otras pandemias) será lo que determine cómo queda reflejada la COVID-19 en la memoria colectiva de un país. «Hasta que no conocemos el final», concluye Wertsch, «no logramos entender el principio y el desarrollo».

PARA SABER MÁS

Science, journalism, and the construction of news: How print media framed the 1918 influenza pandemic. Meg Spratt en *American Journalism*, vol. 18, n.º 3, págs. 61-79, 2001.
Forgetting the presidents. Henry L. Roediger III y K. Andrew DeSoto en *Science*, vol. 346, págs. 1106-1109, noviembre de 2014.
El jinete pálido. 1918: La epidemia que cambió el mundo. Laura Spinney. Crítica, 2018.
Collective memories across 11 nations for World War II: Similarities and differences regarding the most important events. Magdalena Abel et al. en *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, vol. 8, n.º 2, págs. 178-188, junio de 2019.
Una nueva historia de la gripe española: Paralelismos con la COVID-19. Anton Erkoreka Barrena. Lamiñarra Kultur Elkartea, 2020.
La gripe española: 1918-19. María Isabel Porras Gallo. La Catarata, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El virus de la gripe de 1918. Jeffery K. Taubenberger, Ann H. Reid y Thomas G. Fanning en *IyC*, marzo de 2005.
Y se le llamó gripe española. Anton Erkoreka Barrena en *IyC*, junio de 2017.
La pandemia de COVID-19 a la luz de la historia de la medicina. María José Báguena Cervellera en *IyC*, junio de 2020.

CIENCIA EN IMÁGENES

Microinstantá



neas luminosas

Las micrografías ópticas obtenidas por científicos y aficionados revelan detalles asombrosos de la naturaleza

Andrea Gawrylewski

Ilustraciones cortesía de Nikon Small World

VISTA DORSAL de un pez cebra juvenil donde se observa el esqueleto y las escamas (*azul*) y los vasos linfáticos (*naranja*).

DANIEL CASTRANOVA, BRANT WEINSTEIN Y BAKARY SAMASA, INSTITUTOS NACIONALES DE SALUD DE EE.UU.


Andrea Gawrylewski es periodista especializada en ciencia y editora de *Scientific American*.

El ojo humano es un órgano con limitaciones. El segmento del espectro electromagnético que nos resulta visible supone apenas en torno al 0,0035 por ciento de toda la luz del universo. Un ojo normal dotado de una agudeza visual de 20/20 es capaz de discernir los objetos con nitidez hasta unos cinco kilómetros de distancia y distinguir objetos de 0,1 milímetros de tamaño. Del mismo modo que los catalejos y los telescopios ponen al alcance de nuestra visión la Tierra y el cosmos, los microscopios ópticos nos permiten asomar nuestra mirada a escalas cientos de veces más pequeñas de las que seríamos capaces de ver. Los descubrimientos hechos en los campos de la medicina, la biología, la geología y la ciencia vegetal gracias a la técnica microscópica son incontables.

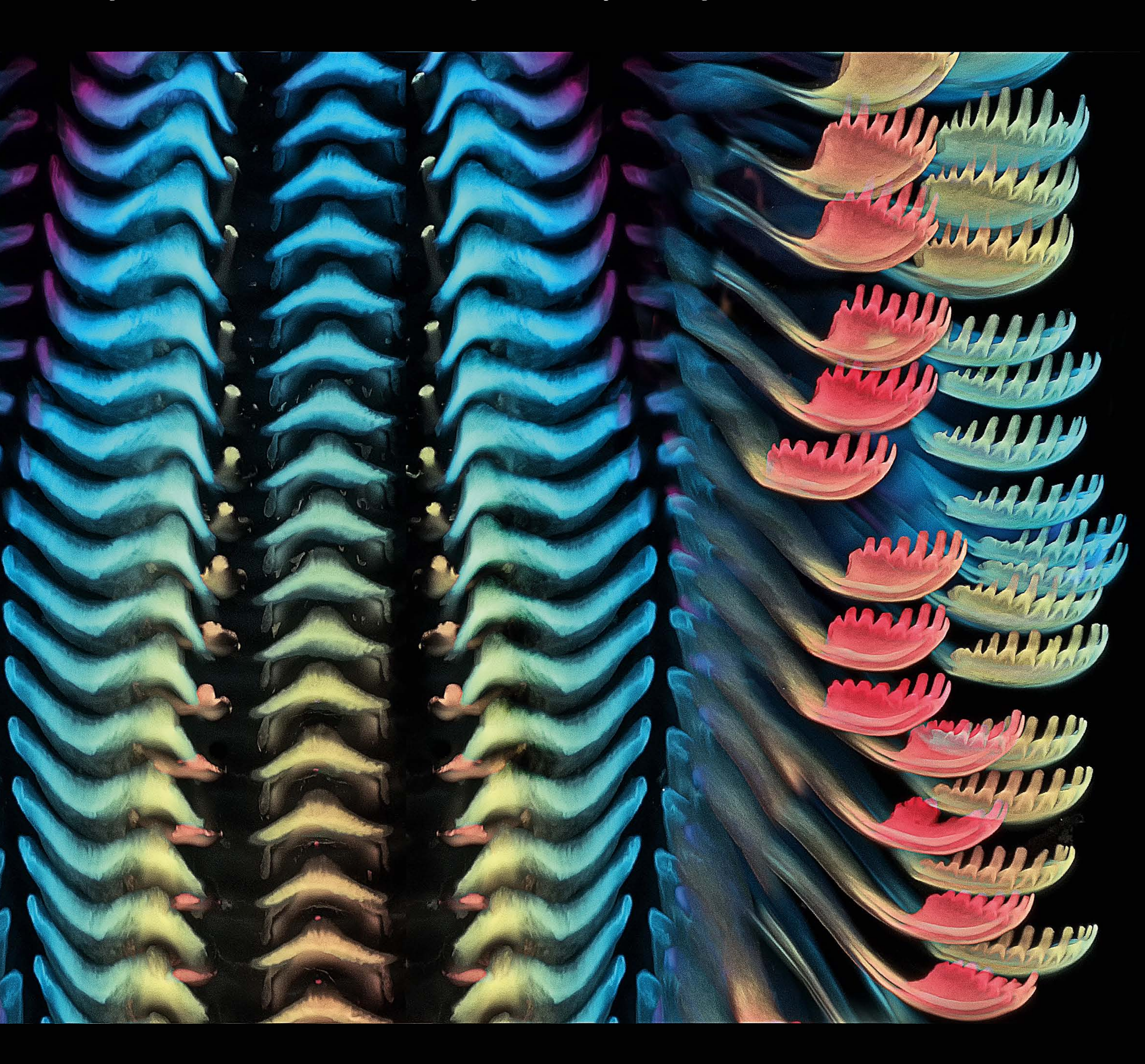


RÁDULA DE UN CARACOL DE AGUA DULCE, teñida y captada en forma de yuxtaposición de imágenes. El reino de los animales diminutos está repleto de formas extrañas, a veces se diría incluso que venidas de otros mundos, opina su creador, Igor Siwanowicz, del Instituto de Medicina Howard Hughes. Este obtuvo el caracol del acuario de su compañero de laboratorio. Aclara que «se trata de la lengua del molusco, que recuerda a un suntuoso candelabro rococó». La imagen mereció el tercer premio del concurso de fotografía Nikon Small World.

IGOR SIWANOWICZ, INSTITUTO MÉDICO HOWARD HUGHES

Desde hace ya 46 años, la empresa de fotografía Nikon patrocina el concurso Small World, que premia la excelencia en la fotografía a escalas minúsculas, lograda con la ayuda del microscopio óptico. Los científicos constituyen una parte importante de los participantes porque su trabajo les lleva casi de forma natural a visualizar cosas extraordinarias. En este artículo se exponen la imagen ganadora de la edición de 2020, así como una selección de las mejores imágenes hecha por nuestros editores. Para el participante Jason Kirk, del Colegio Baylor de Medicina, el concurso supone una «oportunidad única para celebrar la confluencia del arte con la ciencia. Imágenes como las aquí expuestas constituyen un nexo [magnífico] entre la comunidad científica y el gran público».

La ganadora de este año, la imagen de un joven pez cebra (*páginas anteriores*), forma parte del trabajo de un equipo investigador de la Red de Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. Los autores han descubierto que el cráneo de este pez alberga vasos linfáticos, algo que hasta ahora se creía exclusivo de los mamíferos. Este hallazgo podría acelerar y revolucionar la investigación de las enfermedades neurológicas como el alzhéimer. Unieron más de 350 imágenes en una sola para crear la ganadora.



ESCAMA DEL ALA DE UNA MARIPOSA EMPERADOR AZUL (*Papilio ulysses*). El autor, Yousef Al Habshi, afirma que la dificultad de la fotografía radicó en encontrar el balance focal correcto entre la cámara y las escamas para captar la luz, a la vez que evitaba la sobre o la infraexposición.

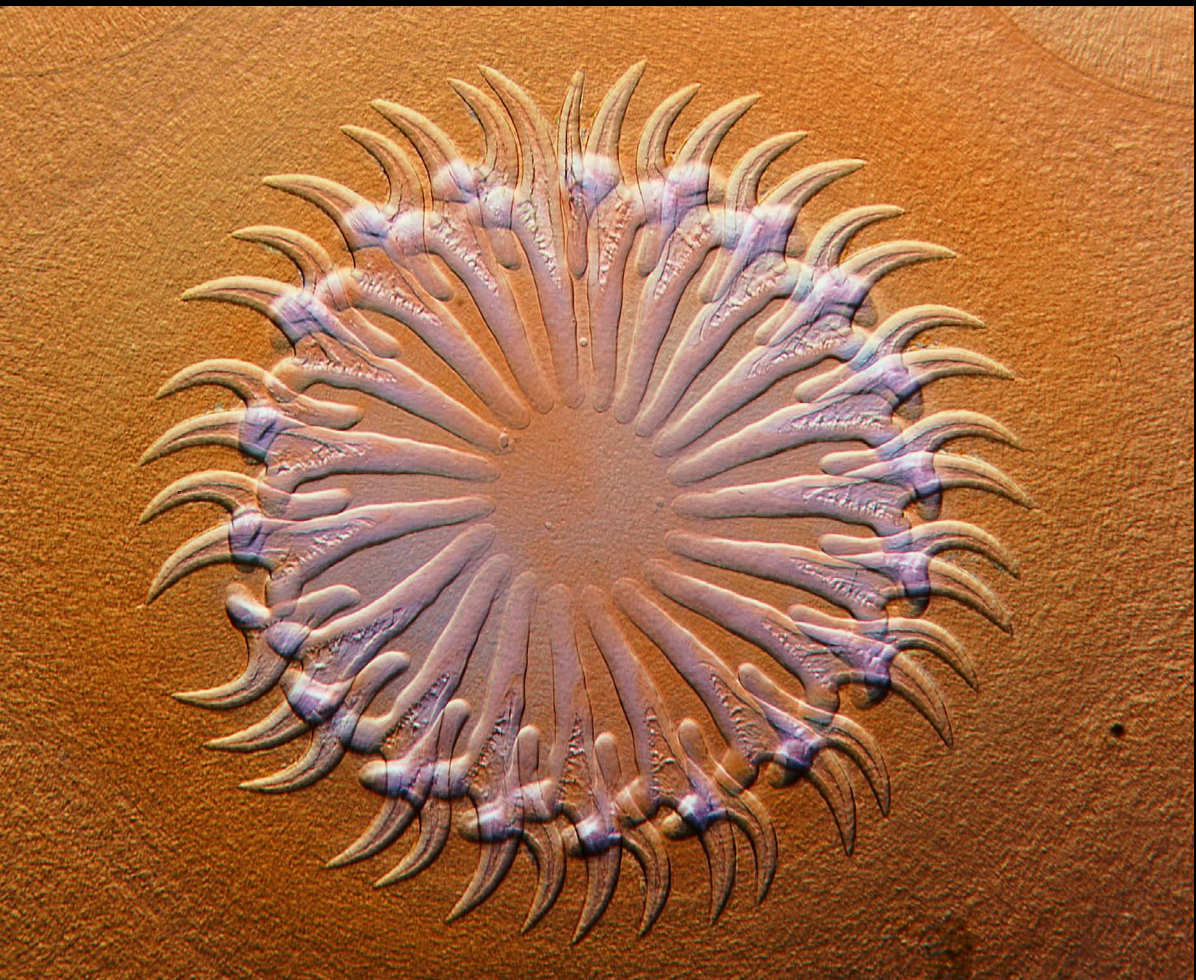
LA PULGA DE AGUA, O DAFNIA (*Daphnia*), es un habitante microscópico del agua. Para obtener la imagen, el fotógrafo Paweł Błachowicz usó la técnica de reflexión: la cámara capta la luz reflejada por el objeto. Błachowicz explica que el método normalmente se reserva para los objetos opacos, así que fue toda una sorpresa obtener este resultado espectacular. «Pese a su transparencia, la dafnia luce este aspecto asombroso con la luz reflejada», añade.



YOUSEF AL HABSHI (*ala de mariposa*); PAWEŁ BŁACHOWICZ (*pulga de agua*); JUSTIN ZOLL (*cristales*)

CRISTALES formados al calentar una disolución de etanol y agua que contenía L-glutamina y beta-alanina. Las proporciones de ambos aminoácidos han de ser las precisas para que aparezcan las formaciones cristalinas, aclara el fotógrafo Justin Zoll. Empleó un filtro polarizador para captar la imagen, que ocupó el decimotercer puesto.

VISTA LATERAL de un escarabajo cigarrero de la vid (*Byctiscus betulae*). El exoesqueleto duro es muy reflectante y ahí radica la dificultad de la toma, explica el fotógrafo Özgür Kerem Bulur, que tuvo que dar con el balance de luz adecuado para captar los colores iridiscentes. Su obra quedó en el decimocuarto puesto.



ESCÓLEX O CABEZA DE TENIA (*Taenia pisiformis*), extraída del intestino de un conejo. El ángulo de toma muestra el rostelo armado de ganchos con el que este parásito se aferra al tubo digestivo del hospedador. «Me encanta la belleza geométrica de la imagen, sus cualidades esculturales y su ambigüedad», afirma su autor, David Maitland. «¿Es un fósil o algo incluido en piedra arenisca? ¿Qué es?»



MICROTÚBULOS (*naranja*) del interior de una célula endotelial de una arteria pulmonar bovina. El núcleo celular aparece coloreado de azul claro. En su trabajo, Jason Kirk, del Colegio Baylor de Medicina, usa estas células para calibrar el equipo de microscopía. Pero el resultado final, que quedó en séptimo lugar, merece el reconocimiento por su valor artístico.

ÖZGÜR KEREM BULUR (*escarabajo cigarrero*); DAVID MAITLAND (*cabeza de tenia*); JASON KIRK, COLEGIO BAYLOR DE MEDICINA (*célula*)

PARA SABER MÁS

Small World Nikon. https://www.nikonsmallworld.com/

EN NUESTRO ARCHIVO

Miniaturas deslumbrantes. Gary Stix en *IyC*, febrero de 2012.
Maravillas diminutas. Kate Wong en *IyC*, marzo de 2013.
La vida bajo una lente. Ferris Jabr en *IyC*, enero de 2014.
Vida a lo grande. Kate Wong en *IyC*, enero de 2015.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Conducir sin sacudidas

La suspensión y los amortiguadores de un vehículo aseguran que este se mantenga pegado a la calzada. Sin embargo, han de tener también en cuenta la biomecánica del cuerpo humano

LAS RUEDAS DE LOS VEHÍCULOS están equipadas de una suspensión (un muelle) y un amortiguador. La combinación de ambos atenúa los efectos de las irregularidades de la calzada.

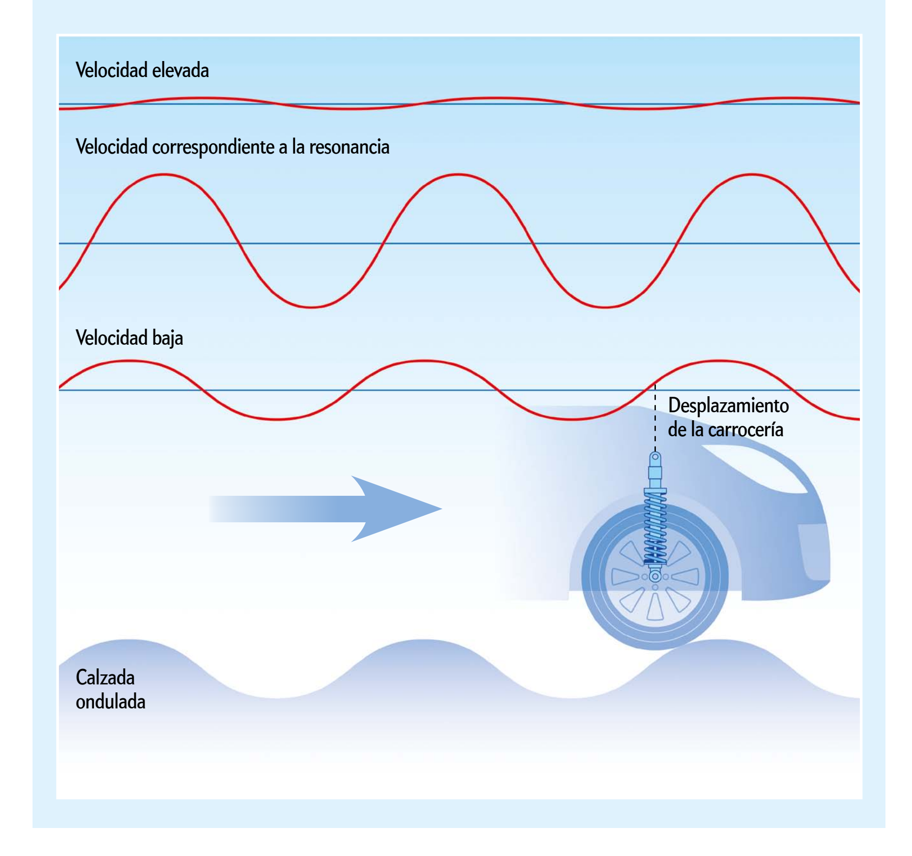
Las carreteras nunca son perfectamente planas. Cuando se deterioran, los baches y las elevaciones de la calzada inducen en las ruedas de nuestro vehículo un movimiento vertical, el cual se transmite a la carrocería y a los pasajeros. Los inconvenientes son múltiples: pérdida de contacto entre las ruedas y el asfalto, desgaste de la estructura del automóvil, incomodidades para los pasajeros... Para evitarlo, los sistemas de suspensión desempeñan una función clave. Pero ¿cómo se eligen sus características?

El análisis de los movimientos de la carrocería de un vehículo y de su comportamiento en carretera puede complicarse con rapidez. Por ello, en lo que sigue nos limitaremos a los movimientos verticales de un automóvil que viaja en línea recta. Agucemos el ingenio e imaginemos un vehículo sin suspensión; es decir, con unos ejes unidos rígidamente al chasis.

Cuando la calzada sea plana no sucederá nada reseñable. Pero, si aparece un desperfecto, las ruedas experimentarán una aceleración vertical. Aunque levemente compresibles, los neumáticos no podrán absorber esa deformación, por lo que transmitirán a la carrocería una aceleración vertical y, con ella, una velocidad en la misma dirección. ¿Qué ocurre entonces?

OSCILACIONES ACOPLADAS

EL MOVIMIENTO VERTICAL de la carrocería de un vehículo dotado de suspensión y que rueda sobre una calzada ondulada depende de su velocidad. Cuando esta es elevada (*arriba*), la amplitud del movimiento es pequeña. Cuando es reducida (*abajo*), la carrocería sigue la deformación de la calzada. Sin embargo, cuando la frecuencia de oscilación que inducen las ondulaciones de la carretera se aproxima a la frecuencia propia de los muelles de suspensión (*centro*), se produce una resonancia y las oscilaciones se amplifican. La función de los amortiguadores consiste en limitar dicho efecto.



ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

Muelles de suspensión

Supongamos que el vehículo pasa por un badén a 36 kilómetros por hora; esto es, 10 metros por segundo. Cuando las ruedas delanteras avanzan sobre el lado ascendente, al que supondremos una pendiente del 10 por ciento, llevan una velocidad hacia arriba de 1 metro por segundo. Después de que rebasen la cima del badén, perderán contacto con la calzada y el vehículo «despegará»: pese a la gravedad, conservará esa velocidad ascendente durante 0,2 segundos y, como consecuencia, recorrerá al menos 2 metros antes de volver a hacer contacto con el suelo.

Para evitarlo, hay que impedir que el movimiento vertical de las ruedas se transmita rápida y totalmente a la carrocería, a fin de que esta permanezca horizontal pese al badén. Este requisito nos lleva a incorporar una suspensión compresible: justo lo que consiguen los muelles que podemos ver en la mayoría de los vehículos.

En su régimen habitual de funcionamiento, la variación de longitud de un muelle (alargamiento o acortamiento) es proporcional a la fuerza que se ejerce en sus extremos. La inversa de esa constante de proporcionalidad corresponde a lo que llamamos rigidez: cuanto mayor sea esta, menos se deformará el muelle para una fuerza dada.

Sin embargo, este mecanismo introduce una nueva dificultad. Una masa m (la carrocería) apoyada en resortes (la suspensión) oscilará verticalmente nada más recibir un impulso. La frecuencia de esas oscilaciones, conocida como frecuencia propia, no depende de la amplitud del movimiento, sino que es proporcional a la raíz cuadrada de k/m, donde k denota la constante de rigidez del muelle. Así pues, aunque al pasar por un badén los resortes se compriman y ello reduzca el movimiento ascendente de la carrocería, ese comportamiento tiene un precio: la carrocería comenzará a oscilar.

La historia no acaba ahí, puesto que las carreteras están siempre un tanto onduladas. En la práctica, se toleran ondulaciones de amplitud comprendida entre 2 y 20 milímetros para distancias entre crestas de entre 1 y 50 metros. A velocidades de entre 1 y 35 metros por segundo, eso genera vibraciones con frecuencias de entre 0,02 y 35 hercios.

Si el vehículo avanza lentamente, la frecuencia de las oscilaciones verticales impuestas por la calzada será menor que la frecuencia propia del vehículo; este seguirá el movimiento vertical de las ruedas, pero, dado que dicho movimiento es lento, ello no supondrá realmente un problema. Por otro lado, si el automóvil avanza a gran velocidad, las oscilaciones serán más rápidas que la frecuencia pro-

pia, en cuyo caso la carrocería apenas se moverá según la vertical y la suspensión cumplirá perfectamente su función.

No obstante, si la frecuencia de las oscilaciones es próxima a la frecuencia propia del vehículo, se producirá una resonancia: las oscilaciones de la carrocería se amplificarán, y esta se moverá verticalmente con amplitudes muy superiores a las que inducen las irregularidades de la calzada.

Amortiguadores

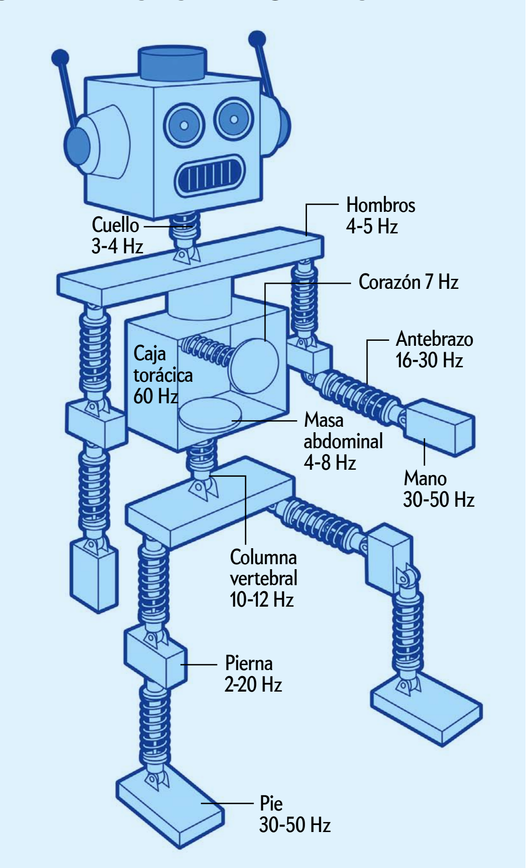
¿Qué hacer? En primer lugar, habremos de limitar al máximo las oscilaciones libres de nuestro sistema masa-muelle. Tal es el papel de los amortiguadores, esos dispositivos insertados a lo largo del eje de los muelles de suspensión. Con todo, deberemos ajustar correctamente la amortiguación: si es muy baja, no evitará muchos rebotes; si es excesiva, no habrá rebotes, pero el tiempo de retorno al equilibrio será demasiado largo, lo que perjudicará al confort de los pasajeros si las irregularidades se suceden demasiado rápido.

Por ello, el coeficiente de amortiguamiento se elige de modo que el sistema de suspensión-amortiguación se encuentre cerca de su régimen «crítico», en que los rebotes han desaparecido y el retorno al equilibrio es lo más rápido posible. (Para un amortiguamiento dado, el régimen crítico depende de la frecuencia propia y, por tanto, de la masa del vehículo y de su carga.) Otra ventaja de esta opción es que la amplificación del movimiento debida a la resonancia —la que se produce cuando la frecuencia de excitación se aproxima a la frecuencia propia del sistema no amortiguado— es poco acusada.

Queda una última cuestión: ¿cuál debe ser la rigidez de los muelles de suspensión? Para comodidad de los pasajeros, estos deberían ser blandos. Sin embargo, no pueden serlo demasiado, ya que han de limitar la amplitud del movimiento de suspensión. Más allá de esto, es el confort de los pasajeros lo que determina la rigidez de los muelles, los cuales se eligen de modo que la frecuencia de resonancia del sistema carrocería-suspensión tenga el valor menos desagradable para el cuerpo humano.

UN CUERPO DE MASAS Y MUELLES

DESDE EL PUNTO DE VISTA BIOMECÁNICO, el cuerpo humano puede modelizarse como un conjunto de masas unidas por muelles amortiguados. Esto se aplica tanto a las extremidades como a los órganos internos. Cada sistema masa-muelle se caracteriza por una frecuencia propia, la cual determina su comportamiento ante vibraciones externas. Las suspensiones de los automóviles tienen en cuenta dicho efecto. En particular, evitan que el vehículo oscile a frecuencias demasiado próximas a las frecuencias propias de las distintas partes del cuerpo, ya que de lo contrario las vibraciones se amplificarían por efecto de la resonancia. Como resultado, las suspensiones se diseñan para que su frecuencia de resonancia se aproxime a 1 hercio (Hz).



Factores biomecánicos

En primer lugar hay que evitar el mareo, el cual aparece cuando nuestro oído interno se somete a frecuencias inferiores a 1 hercio. Aparte de esto, el cuerpo humano es en líneas generales muy sensible a vibraciones de unos 20 hercios o menos: precisamente las que tiende a experimentar un vehículo.

Aunque el análisis biomecánico es complejo, podemos modelizar las distintas partes de nuestro cuerpo como sistemas masa-muelle y determinar sus frecuencias propias. Además de las vibraciones de la cabeza, la columna vertebral o las extremidades, este análisis revela que también los órganos internos pueden moverse con respecto al resto del cuerpo. Y si nos sometemos a sacudidas con un ritmo cercano a sus frecuencias propias (de unos 7 hercios para el corazón, entre 4 y 8 para el hígado, y entre 6 y 12 para los riñones, por ejemplo) pueden aparecer trastornos y dolores.

Un análisis detallado revela que la sensibilidad del organismo humano a las vibraciones verticales es mínima cuando estas se sitúan en torno a 1 hercio. Es esta frecuencia la que nos permite diseñar las suspensiones óptimas: para una masa de una tonelada (250 kilogramos por rueda), encontramos rigideces de 10 kilonewtons por metro y un tiempo de relajación (retorno al equilibrio) del orden de algunas décimas de segundo. Sorprendentemente, tales cifras resultan ser muy similares a las que encontramos en el mundo real a pesar de las simplificaciones de nuestro modelo, el cual omite las vibraciones de los neumáticos o de los asientos y supone suspensiones puramente pasivas. IyC

PARA SABER MÁS

Effects of shock and vibration on humans. Henning E. von Gierke y Anthony J. Brammer en *Harris' shock and vibration handbook*, dirigido por Cyril M. Harris y Allan G. Brammer. McGraw-Hill, 2002.

Fun with automobile springs. Klaus Fritsch en *The Physics Teacher*, vol. 44, págs. 451-454, septiembre de 2006.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los músculos del oído medio. Erik Borg y S. Allen Counter en *IyC*, octubre de 1989.


COVID-19
UN RETO
CIENTÍFICO
Y SOCIAL

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



La hipótesis de Riemann (II)

El teorema de los números primos

Es evidente que los primos están distribuidos de manera aleatoria; pero, por desgracia, no sabemos qué significa «aleatorio» en este caso.
—R. C. Vaughan

En la columna anterior vimos que los números primos, a pesar de su elementalidad, aparecen a lo largo de la sucesión de los números naturales de manera errática. En el artículo de este mes veremos algo que contrasta de manera sorprendente con lo anterior: que, para números muy altos, resulta posible predecir bastante bien la cantidad media de primos que van surgiendo en la sucesión de los naturales. Y lo que es más, la fórmula correspondiente resulta ser asombrosamente sencilla. Este hecho constituyó uno de los grandes misterios de la teoría de números y tiene una larga historia que se remonta a más de dos siglos atrás.

Comencemos hablando sobre la densidad de primos. La densidad de los números pares en el conjunto de los naturales tiende a 1/2 a medida que tomamos más y más números. Los matemáticos dicen entonces que la «densidad límite» de los múltiplos de 2 es 1/2. En general, la densidad límite de los múltiplos de un número natural n cualquiera será $1/n$. Pero ¿cuál es la densidad de los números primos?

Resulta intuitivo entender que los primos se rarifican, que son cada vez más escasos a medida que avanzamos en los naturales. Esto se debe a que, para que un número sea primo, es necesario que ningún primo anterior lo divida. Por tanto, cuanto mayor sea un número natural, más condiciones tendremos que exigirle para que sea primo.

Para determinar la densidad límite de los primos podemos razonar de la siguiente manera. ¿Cuál es la densidad límite de los números que no son múltiplos de 2? Si la de los números pares es 1/2, la de los números impares será $(1-1/2)$. ¿Y la densidad límite de los números que no son múltiplos de 2 ni de 3? Si suponemos independencia y obviamos las correlaciones que producen los números compuestos divisibles por 2 y por 3 a la vez, la respuesta es $(1-1/2)(1-1/3)$.

En el siglo XVIII, Adrien-Marie Legendre extendió este razonamiento a todos los primos, proponiendo como su densidad límite

$$\lambda = \prod_{p_i} \left(1 - \frac{1}{p_i}\right),$$

donde el productorio recorre la sucesión infinita de los números primos. Para evaluar λ, tomó su inversa y expandió cada factor como una serie de Taylor del tipo

$$(1-x)^{-1} = 1 + x + x^2 + \cdots .$$

donde $|x| < 1$. Haciendo $x = 1/p_i$, vemos que

$$\lambda^{-1} = (1 + 1/2 + 1/2^2 + \cdots) \times (1 + 1/3 + 1/3^2 + \cdots) \times \cdots .$$

Notemos ahora que el resultado de este producto infinito de series es una suma de infinitas fracciones cuyos denominadores incluyen todos los productos posibles de números primos con todas sus posibles potencias, y donde además cada combinación solo aparece una vez. Por el teorema fundamental de la aritmética, sabemos que lo anterior equivale a la lista de todos los números naturales. Por tanto:

$$\lambda^{-1} = 1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + \cdots .$$

El resultado es la famosa serie armónica, la cual diverge. Como consecuencia, obtenemos que la densidad límite de números primos es cero.

La intuición del joven Gauss

A la edad de 15 años, a Karl Friedrich Gauss le regalaron un libro de tablas de logaritmos. El mamotreto contenía también unas tablas que al instante lo hipnotizaron: tablas de números primos. El joven Gauss no lograba apreciar orden alguno en aquellas listas. La etiqueta «primo» parecía asignada de manera totalmente aleatoria en la sucesión de los números naturales.

Sin embargo, aunque no parecía posible predecir las posiciones concretas de los números primos, tal vez fuera posible determinar cuántos números primos ha-



ADRIEN-MARIE LEGENDRE en una caricatura de 1820. En 1798, el matemático francés publicó una de las primeras versiones de la conjetura de los números primos.

JULIEN-LÉOPOLD BOILLY/DOMINIO PÚBLICO

bía por debajo de cada número natural. En otras palabras, Gauss pretendía encontrar una aproximación a lo que hoy conocemos como «función contador de números primos». Esta función, denotada por $\pi(x)$, se define como la cantidad de números primos menores o iguales que el número real x. Por ejemplo,

$$\pi(11{,}75)=5\ ,$$

ya que por debajo de 11,75 hay 5 números primos: 2, 3, 5, 7 y 11, la secuencia que en *Contact* convenció a Ellie Arroway de que se había recibido el primer mensaje de una civilización extraterrestre.

Como vemos en la primera gráfica de la figura 1, donde $\pi(x)$ aparece representada hasta $x=100$, se trata de una función escalonada que asciende una unidad cada vez que llegamos a un nuevo primo. La disparidad de distancias entre primos sucesivos, dadas por los tamaños horizontales de los escalones, resulta en extremo irregular, como apreció Gauss. Esto mismo ocurre «localmente» en cualquier intervalo de tamaño similar.

No obstante, si representamos $\pi(x)$ para valores muy grandes de x, podremos comprobar lo acertada que era la intuición de Gauss. En la segunda gráfica de la figura 1 se muestran los valores de $\pi(x)$ hasta más allá de los primeros 50.000 números, en cuyo caso vemos que la función exhibe un sorprendente «buen comportamiento». El joven Gauss debió sentir lo mismo que más tarde sentirían otros muchos matemáticos: que la suavidad con que asciende esta curva constituye uno de los hechos más asombrosos de la matemática. ¿Qué ley la gobierna?

Analizando la densidad de números primos entre 1 y 3.000.000 a intervalos de 1000, Gauss fue capaz de proponer una respuesta. Observemos la tabla de la figura 2. Cuando x pasa de 10.000 a 100.000, el cociente $x/\pi(x)$ (el inverso de la densidad provisional de primos) pasa de 8,1 a 10,4; esto es, aumenta en 2,3 unidades. Y dicho incremento parece mantenerse constante con cada cambio de orden de magnitud. Se ve que al joven Gauss también le sirvieron las tablas de logaritmos, ya que supuso que ese incremento constante venía dado por el logaritmo natural de 10, $\ln 10=2{,}30258\ldots$ Es decir:

$$\frac{x}{\pi(x)} \approx \frac{x/10}{\pi(x/10)} + \ln 10\ .$$

Esto le llevó a conjeturar que

$$\pi(x) \approx \frac{x}{\ln x}\ ,$$

solución que cumple la relación indicada arriba, como el lector puede comprobar con facilidad. Y de hecho, Gauss no iba nada desencaminado. En la figura 3 podemos apreciar la bondad de esta aproximación.

Gauss anotó estos hallazgos en un cuaderno en 1792, pero no los hizo públicos hasta 1849, ya que carecía de argumentos rigurosos para su demostración. Así que fue Legendre quien, con menos reparos, se llevó la fama al publicar, en 1798, que para números grandes $\pi(x)$ podía aproximarse por la sencilla función

$$\pi(x) \approx \frac{x}{\ln x + a}\ .$$

Esto supuso la primera presentación oficial de la conjetura de los números primos. Diez años después, basándose en una tabla de números primos hasta $x=1.000.000$, Legendre propuso como mejor ajuste el valor $a = -1{,}08366$.

Un argumento «físico»

Gauss y Legendre dedujeron estas expresiones a partir de un razonamiento puramente empírico. Sin embargo, es posible derivarlas sin examinar el comportamiento de las tablas de primos. Para ello basta con razonar tal y como lo haría un físico, a partir del concepto de densidad.

Asumamos, como hizo Legendre, que la densidad media de primos hasta x viene dada por

$$\lambda(x) = \prod_{p_i<x}\left(1-\frac{1}{p_i}\right).$$

Extrayendo logaritmos a ambos lados y usando la aproximación de Taylor

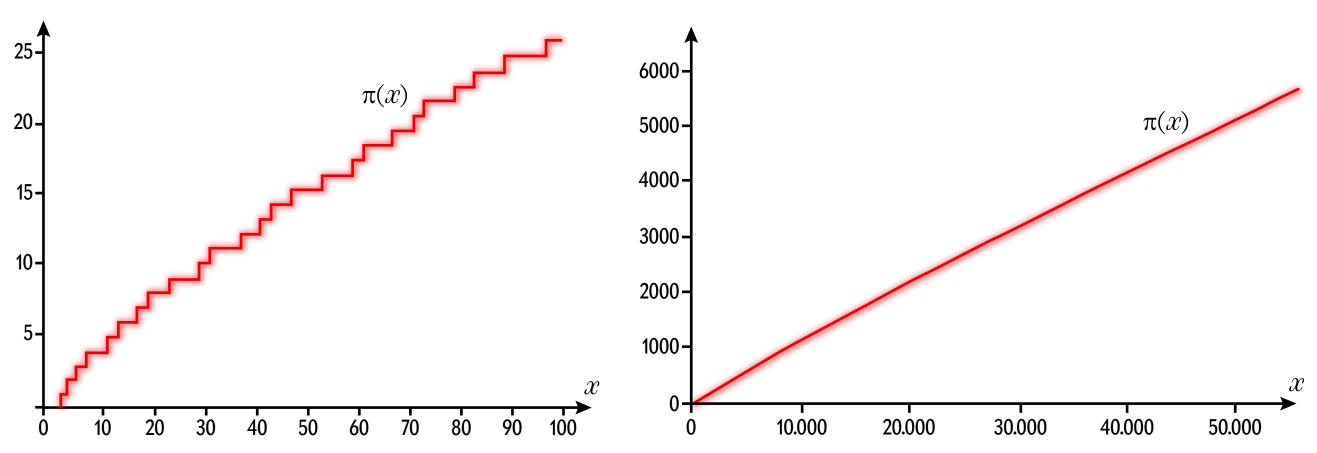
$$\ln(1-x) \approx -x,$$

válida para $|x| < 1$, podemos trocar el productorio en un sumatorio más fácil de computar:

$$\ln \lambda(x) = \sum_{p_i<x} \ln\left(1-\frac{1}{p_i}\right) \approx -\sum_{p_i<x}\frac{1}{p_i}\ .$$

Pero ¿cómo evaluar el sumatorio si solo corre para los números primos? El truco consiste en interpretar la densidad $\lambda(x)$ como la probabilidad de que el número natural x sea primo. En tal caso, podemos escribir la suma anterior como una suma sobre todos los números naturales, en la que cada término está convenientemente ponderado por su probabilidad de ser primo. Es decir:

$$\ln \lambda(x) \approx -\sum_{p_i<x}\frac{1}{p_i} \approx -\sum_{n=2}^{x}\frac{\lambda(n)}{n}$$
$$\approx -\int_2^x \frac{\lambda(n)}{n}\,dn\ ,$$



1. LA FUNCIÓN contador de números primos, $\pi(x)$, se define como la cantidad de números primos menores o iguales que x. Su representación para los primeros 100 números (*izquierda*) muestra su comportamiento irregular y aparentemente aleatorio. Sin embargo, para números muy grandes (*derecha*), esos detalles irregulares se pierden y aparece una suave curva ascendente.

x	$\pi(x)$	$\frac{x}{\pi(x)}$	$\frac{x}{\pi(x)} - \frac{x/10}{\pi(x/10)}$
10	4	2,5	
10^2	25	4,0	1,5
10^3	168	6,0	2,0
10^4	1229	8,1	2,1
10^5	9592	10,4	2,3
10^6	78.498	12,7	2,3
10^7	664.579	15,0	2,3
10^8	5.761.455	17,4	2,4
10^9	50.847.534	19,7	2,3
10^{10}	455.052.512	22,0	2,3

2. UNA TABLA DE ESTE ESTILO debió inspirar a Gauss para postular su conjetura sobre el comportamiento de la función contador. En ella se muestran los valores de $\pi(x)$ para las primeras potencias de 10, el valor de $x/\pi(x)$, y las diferencias de esta cantidad entre sucesivos órdenes de magnitud. Como vemos, dicha diferencia parece tender a la constante $\ln 10 \approx 2{,}3$.

donde en el último paso hemos reemplazado la suma por una integral, dado que estamos trabajando con números grandes.

Reescribiendo esta expresión en términos de la distancia media provisional entre primos, $\Delta(x) = 1/\lambda(x)$, y derivando a ambos lados, llegamos a la ecuación diferencial

$$\frac{\Delta'(x)}{\Delta(x)} \approx \frac{1}{x\Delta(x)} \ .$$

Que, tras simplificar $\Delta(x)$, se deja integrar trivialmente y nos conduce a

$$\lambda(x) = 1/\ln x \ .$$

O, dicho de otra forma: que el número medio de primos hasta x es $x/\ln x$.

Una aproximación mejor

De hecho, Gauss abordó la cuestión de una forma heurística semejante para llegar a otra expresión para la función contador. Dado que $\pi(x)$ nos da la cantidad total de primos hasta x, $\pi(x)/x$ representa la densidad media de primos menores que x. Por tanto, siempre podremos escribir la cantidad total de primos hasta x como la integral de dicha densidad, que si suponemos que es $1/\ln x$ nos lleva a la expresión

$$\pi(x) \approx \int_2^x \frac{dt}{\log t} \equiv \mathrm{Li}(x) \ .$$

Esta función, que carece de expresión analítica cerrada, se conoce como «logaritmo integral», o integral logarítmica euleriana, y hoy sabemos que constituye una mejor estimación de la función contador que la expresión puramente logarítmica. En la figura 3 podemos observar cómo su gráfica resulta a la vista prácticamente indistinguible de la de $\pi(x)$.

En la tabla de la figura 4 podemos leer los valores exactos del error cometido al aproximar la función contador por el logaritmo integral. Dichos valores insinúan que la diferencia siempre será positiva. Sin embargo, con los números primos nunca podemos fiarnos. En 1914, John Edensor Littlewood demostró que el error cambiaba infinitas veces de signo. Y años más tarde, su estudiante Stanley Skewes probó que eso ocurría al menos una vez antes de llegar a la espectacular cifra de

$$x = 10^{10^{10^{34}}} .$$

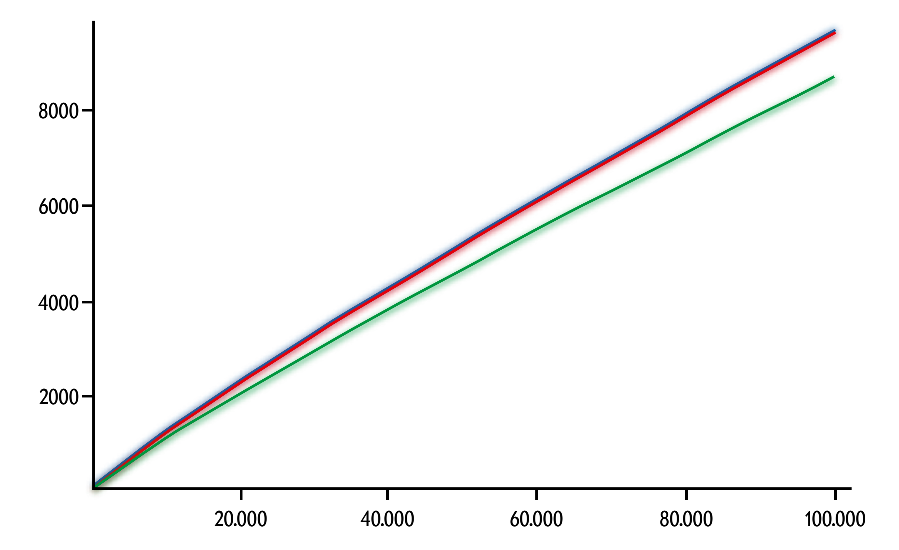
Desde entonces esta cota se ha visto reducida de manera extraordinaria, si bien por ahora nadie ha encontrado el valor exacto en el que el error cambia de signo por primera vez. Y lo mismo ha pasado con el valor absoluto del error. La mejor estimación disponible data de 2016, cuando Tim Trudgian halló una cota superior para el error absoluto para valores de x mayores que 229.

De conjetura a teorema

Durante décadas, las expresiones $x/\ln x$ y $\mathrm{Li}(x)$ para aproximar $\pi(x)$ no fueron más que una conjetura. Esta no se convirtió en teorema hasta finales del siglo XIX. Cuarenta años después de la aproximación de Legendre,

$$\pi(x) \approx \frac{x}{\ln x + a} \ ,$$

Pafnuti Chebyshev demostró que la mejor estimación de $\pi(x)$ se alcanzaba para el valor $a = -1$. Pero, aun así, su error seguía siendo mayor que el de $\mathrm{Li}(x)$. Poco después fue capaz de demostrar la acotación



3. COMPARACIÓN PARA NÚMEROS GRANDES entre la función contador de números primos ($\pi(x)$, *rojo*), la función $x/\ln x$ (*verde*) y la función logaritmo integral ($\mathrm{Li}(x)$, *azul*), que aquí resulta casi indistinguible de $\pi(x)$.

$$A < \frac{\pi(x)}{x/\ln x} < 6A/5$$

con el valor exacto de A = 0,2129... Ello le permitió convertir en teorema la conjetura de Bertrand que mencionábamos en la primera entrega de esta serie y lo dejó a las puertas de conseguir lo mismo para la conjetura de los números primos.

Hubo que esperar medio siglo más, hasta 1897, para que Jacques Salomon Hadamard primero y, un año después y de manera independiente, Charles Jean Étienne Gustave Nicolas, barón de la Vallée-Poussin, demostraran el teorema de los números primos. Este establece de manera rigurosa que

$$\pi(x) \sim \frac{x}{\ln x} \ ,$$

donde el símbolo ~ significa que las funciones son asintóticas, es decir que

$$\lim_{x\to\infty} \frac{\pi(x)}{x/\ln x} = 1 \ .$$

Observemos que el teorema no nos dice que $\pi(x)$ sea igual a $x/\ln x$ para valores grandes de x, sino que el error relativo, $|\pi(x) - x/\ln x|/\pi(x)$, se hace asintóticamente igual a cero. Lo mismo ocurre, independientemente del valor de a, con cualquiera de las funciones $x/(\ln x + a)$. En este sentido, todas son igual de buenas aproximaciones asintóticas a $\pi(x)$.

Es fácil ver, aplicando la regla de l'Hôpital, que $\text{Li}(x) \sim x/\ln x$, de modo que el teorema de los números primos puede también enunciarse como

$$\pi(x) \sim \text{Li}(x) \ .$$

El teorema de los números primos nos permite derivar algo también sorprendente: una aproximación asintótica sencilla para el enésimo número primo, p_n. Para verlo, notemos primero que, por la propia definición de $\pi(x)$,

$$\pi(p_n) = n \ .$$

Si ahora aplicamos el teorema de los números primos a la cantidad $n\ln n$, obtenemos que

$$\pi(n\ln n) \sim n\ln n/\ln(n\ln n) \sim n \ ,$$

ya que, para números muy grandes,

$$\ln(n\ln n) = \ln n + \ln(\ln n) \sim \ln n \ ,$$

puesto que el logaritmo del logaritmo crece más lentamente que la función logaritmo. Comparando el argumento de $\pi(x)$ en ambas expresiones, vemos que los números primos grandes quedan asintóticamente aproximados por la sencilla fórmula:

$$p_n \sim n\ln n \ .$$

Así que, de alguna manera, parece que en el caos de los números primos sí que comienza a emerger cierto orden. Como escriben Philip J. Davis y Reuben Hersh en *The mathematical experience*, a partir del teorema de los números primos «hemos extraído orden de la confusión, lo que nos da una lección moral sobre cómo las excentricidades individuales pueden coexistir con la ley y el orden».

¿Una expresión exacta?

Por desgracia, por más que estas expresiones para $\pi(x)$ y p_n puedan considerarse buenas aproximaciones para números muy grandes, de ninguna manera constituyen fórmulas explícitas exactas. Además, advirtamos que el teorema de los números primos no nos dice que los errores absolutos $|\pi(x) - x/\ln x|$ o $|\pi(x) - \text{Li}(x)|$ sean cada vez más pequeños a medida que x tiende a infinito. De hecho, puede ocurrir todo lo contrario: por ejemplo, la función x^2 se aproxima asintóticamente a $x^2 + x$. Su cociente tiende a 1, pero su diferencia se hace arbitrariamente grande a medida que x tiende a infinito.

Lo deseable sería encontrar una expresión cuyo error absoluto fuera cero. En la próxima columna continuaremos con la búsqueda que emprendieron los matemáticos para encontrar una fórmula explícita, sin trampa ni cartón, de la función contador. O, como diría mi hijo, el *hackeo* de los números primos. IyC

x	$\pi(x)$	$\lvert\pi(x) - \text{Li}(x)\rvert$	$\frac{\lvert\pi(x) - \text{Li}(x)\rvert}{\pi(x)}$
10^2	25	5	0,20
10^3	168	10	0,0595
10^4	1229	17	0,0138
10^5	9592	38	0,00396
10^6	78.498	130	0,00166
10^7	664.579	339	0,00051
10^8	5.761.455	754	0,000131
10^9	50.847.534	1701	0,0000335
10^{10}	455.052.512	3104	0,00000682
10^{11}	4.118.054.813	11.588	0,00000281
10^{12}	37.607.912.018	38.263	0,00000102
10^{13}	346.065.536.839	108.971	0,000000299
10^{14}	3.204.941.750.802	314.890	0,0000000983
10^{15}	29.844.570.422.669	1.052.619	0,0000000353
10^{16}	279.238.341.033.925	3.214.632	0,0000000115

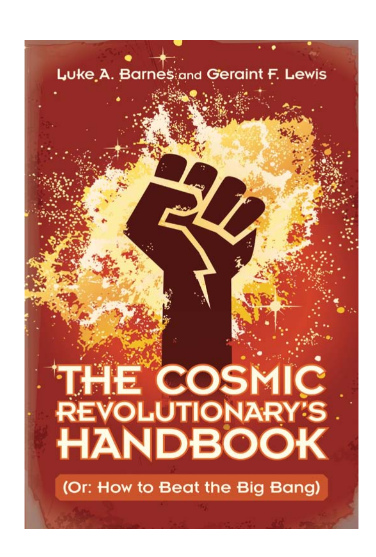
4. LA FUNCIÓN CONTADOR queda muy bien aproximada por la función logaritmo integral, Li(x). Aunque el error absoluto de esta aproximación parece crecer con x, el error relativo tiende a cero, tal y como asegura el teorema de los números primos.

PARA SABER MÁS

The prime numbers and their distribution. Gérald Tenenbaum y Michel Mèndes France. American Mathematical Society, 2001.
La música de los números primos. Marcus du Satoy. Acantilado, 2007.
Number theory in science and communication. M. R. Schroeder. Springer, 2009.
Los números. Javier Cilleruelo y Antonio Córdoba. Catarata/CSIC, 2010.
The PrimePages. Chris K. Caldwell en primes.utm.edu

EN NUESTRO ARCHIVO

A la búsqueda de números primos. Carl Pomerance en *IyC*, febrero de 1983.



THE COSMIC REVOLUTIONARY'S HANDBOOK
(OR: HOW TO BEAT THE BIG BANG)
Luke A. Barnes y Geraint F. Lewis
Cambridge University Press, 2020
286 págs.

Un manual para asaltar los cielos

La cosmología moderna y el funcionamiento de la ciencia

Una de las características fundamentales de la ciencia física es el énfasis en la experimentación frente a la mera observación pasiva de los fenómenos. Usando un símil que se remonta a Francis Bacon, nuestro conocimiento del mundo se basa preferentemente en interrogar a la naturaleza para obtener respuestas precisas a preguntas concretas. Desde este punto de vista, la astrofísica y la cosmología ocupan una posición epistemológica peculiar dentro de la física, en tanto que la experimentación les está vedada por la propia naturaleza de sus objetos de estudio.

Sin embargo, este hecho no merma nuestra confianza en los resultados de ambas disciplinas, las cuales han experimentado un impresionante progreso en el último cuarto de siglo. Hay al menos dos razones que justifican esta seguridad. Una es que lo que sabemos del universo se basa en leyes naturales bien establecidas experimentalmente en laboratorios. La hipótesis básica de que estas leyes no son específicas de nuestro entorno, sino válidas en todos los rincones del cosmos, no ha sido hasta ahora puesta en duda por los hechos.

La segunda razón es que, aunque no podamos reproducir fenómenos astrofísicos en un laboratorio, el propio universo puede considerarse un laboratorio en sí mismo. Las predicciones de los modelos estelares, por ejemplo, se contrastan con observaciones de estrellas de diferentes tipos y en diversos estados de su evolución. De igual manera, los modelos cosmológicos tienen que dar cuenta de una gran cantidad de observaciones distintas, desde la estructura a gran escala en el universo a las abundancias de elementos químicos ligeros. Esta multiplicidad de hechos que exigen una explicación «simula», de alguna forma, la variedad de condiciones experimentales que podríamos conseguir en un laboratorio terrestre.

En el estudio del cosmos, como en cualquier otro ámbito científico, existen también «anomalías»: observaciones que se resisten a ser explicadas por los modelos vigentes. Unas acabarán siendo resueltas mediante pequeñas modificaciones de los modelos, y otras desaparecerán con el uso de instrumentación más precisa. Pero no es imposible que alguna anomalía acabe generando una crisis que obligue a reformular —o más probablemente, a ampliar— nuestras teorías actuales sobre el funcionamiento del universo.

La primera labor del «revolucionario cósmico» ha de ser familiarizarse con el campo que pretende subvertir y aprender a expresarse en su lenguaje natural

Guiados por su experiencia como divulgadores y motivados por el contacto frecuente con un público con inquietudes científicas, los cosmólogos Luke A. Barnes y Geraint F. Lewis han elaborado en *The cosmic revolutionary's handbook* una hoja de ruta para aquellos aficionados a la ciencia que quieran poner en marcha la próxima revolución en cosmología. Uno de los hilos conductores del libro es disipar un error muy extendido en la percepción pública de la ciencia: la creencia de que la comunidad científica es refractaria a las propuestas que contradicen las ideas aceptadas. Antes al contrario, explican los autores, las nuevas teorías son bienvenidas vengan de donde vengan, siempre que mejoren globalmente las teorías actuales y se sometan a las formas y protocolos que dotan de fiabilidad al conocimiento científico. Por ello, la primera labor del «revolucionario cósmico» ha de ser familiarizarse con el campo que pretende subvertir y aprender a expresarse en su lenguaje natural: las matemáticas.

A modo de breve introducción, el libro comienza discutiendo qué es y cómo funciona la ciencia, qué hace que una teoría sea satisfactoria, y cuáles son los mecanismos de validación y comunicación de los resultados científicos. Este último aspecto es de especial interés. No es habitual que un libro de divulgación dedique espacio a cuestiones como el funcionamiento de las revistas científicas, el sistema de revisión por pares o el valor de que un artículo sea citado en otras publicaciones. Cuestiones que, sin embargo, son importantes para transmitir una imagen fidedigna de la actividad científica. Más aún cuando, como en este caso, los aspectos positivos del sistema son presentados sin obviar sus inevitables imperfecciones.

Pero, como hemos dicho, derrocar nuestras teorías sobre el universo exige antes que nada conocerlas en profundidad, tanto en sus éxitos como en sus limitaciones. Por eso, la sección central de *The cosmic revolutionary's handbook* está dedicada a presentar el modelo de la gran explosión desde una perspectiva «ascendente», donde se parte de las observaciones para mostrar diferentes explicaciones de estas, con sus respectivos méritos y deméritos. Con ello se consigue poner de manifiesto de qué manera la explicación proporcionada por el modelo cosmológico

estándar es preferible a las demás. Los autores hacen con ello hincapié en un aspecto clave que el revolucionario cósmico no ha de perder de vista: que su nueva teoría no puede limitarse a explicar una anomalía concreta, sino que tiene también que dar cuenta de todos los demás fenómenos que explicaba la teoría que se ha propuesto desbancar.

El libro construye paso a paso el modelo de la gran explosión, desde las profundas consecuencias de un hecho tan obvio como la oscuridad del cielo nocturno (la paradoja de Olbers) hasta las implicaciones de las medidas del fondo cósmico de microondas realizadas por el satélite Planck. Asistimos a cómo la cosmología estándar va explicando sucesivas observaciones, y a cómo estas descartan a su vez otros modelos alternativos.

Por lo que respecta a la cosmología inflacionaria, presentada a partir de los problemas que la motivaron históricamente, sus consecuencias observacionales se contrastan críticamente con las de otras propuestas que prescinden de la inflación primordial. La discusión no rehúye episodios poco edificantes de la cosmología contemporánea, como el fiasco de BICEP2 en 2014 (el experimento que creyó haber detectado una señal de las ondas gravitacionales emitidas poco después de la gran explosión) y sus aspectos sociológicos [*véase* «¿Inflación o polvo?», por Licia Verde; Investigación y Ciencia, julio de 2014].

Se da también voz a modelos que, con peores perspectivas que la cosmología estándar o simplemente descartados, han competido «en buena lid» en las páginas de las revistas científicas, como los universos lineales o la hipótesis de Dirac de los grandes números, entre otros. Con ello, además de informar al lector sobre otros intentos de explicar el universo, se pretende ilustrar un mensaje central del libro: que las nuevas ideas, por insólitas que resulten, pueden ser tenidas en cuenta y discutidas por la comunidad científica siempre que sean presentadas usando las reglas de juego establecidas.

Además de los problemas que podríamos llamar de condiciones iniciales y que motivan la hipótesis de la inflación cósmica, el modelo de la gran explosión presenta otras fisuras aprovechables por el revolucionario cósmico. Para facilitar su labor, el libro concluye con una discusión de estos problemas pendientes, los cuales van desde explicar la materia y energía oscuras hasta dar cuenta de la abundancia primordial de litio-7. Este último capítulo constituye, de hecho, un estupendo catálogo de los temas en los que podemos esperar avances importantes en un futuro inmediato.

El brillante recurso literario usado por los autores no debe ocultarnos que su libro no está dirigido en exclusiva a aquellos que, tomando al pie de la letra el elogio de Marx a los defensores de la Comuna de París, pretendan asaltar los cielos hasta la misma gran explosión. *The cosmic revolutionary's handbook* es un magnífico trabajo de divulgación que compite con los mejores de este género. Lo que consigue va más allá de transmitir una imagen precisa y equilibrada de los cimientos observacionales del modelo cosmológico estándar, algo que por sí mismo ya revestiría suficiente interés. Al ser un libro escrito en buena medida «en primera persona», resulta también una magnífica guía para entender en qué consiste la cosmología como actividad y el trabajo real de los científicos. Todo ello contado en un lenguaje accesible, distendido y coloquial, y recurriendo con frecuencia al humor. Una obra que sin duda hará las delicias de cualquier lector ávido de saber más sobre cosmología y sobre los cosmólogos.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca



UN MUNDO DE ARTEFACTOS
BREVE HISTORIA DE LA CIENCIA Y DE LA TÉCNICA

Javier de Lorenzo
Trotta, 2020
288 págs.

La historia de la ciencia como historia del hacer científico

Una mirada distinta a las revoluciones científicas y técnicas que han fraguado nuestro mundo

La evolución que experimenta nuestra especie es fruto de una mutua implicación entre los procesos naturales y la intervención del ser humano en esos mismos procesos. Estos cambios y transformaciones se deben a la ciencia y a la técnica y son consecuencia de los artefactos conceptuales y tecnológicos. Esta es la tesis capital de *Un mundo de artefactos*, el último libro del matemático y filósofo Javier de Lorenzo. El autor sostiene que vivimos en una sociedad estructurada por artefactos, un término que debe entenderse como todo aquello que es producido por el ser humano y que altera el curso natural. Ahora bien, tan ligada está la producción de artefactos a la especie humana que, según De Lorenzo, hoy se considera como natural lo que de hecho es, sin duda alguna, un artefacto. Artefactos materiales, pero también no materiales, como las ideologías, los mitos, los teoremas o las teorías científicas. En definitiva, artefactos que contribuyen a generar los ámbitos tecnológicos y simbólicos que nos permiten explicar dónde estamos hoy. Y también —y este es el meollo del texto— reconstruir la historia de cómo hemos llegado hasta aquí.

Tanto la Revolución agrícola en el Neolítico como la Revolución científica del siglo xvii abren dos líneas fundamentales para el estudio de la historia de la ciencia: que la *physis* es manipulable y que es dinámica. Esto es, que no todo está dado por la naturaleza y que el conocimiento científico conlleva la marca indeleble de

la incertidumbre. De ellas se nutre el concepto filosófico que ha vertebrado toda la producción académica de Javier de Lorenzo: el *hacer científico*.

Desde esta comprensión del hacer se vehiculan todos los conceptos clave de la producción «artefactual» de nuestra civilización. Ideas como las de dominio, control e intervención, así como las relativas al control del tiempo, al espacio o al análisis de la causalidad, entre otras, configuran la aparición de tres dimensiones de artefactos que acontecen en cada uno de los grandes períodos de la evolución científica: simbólico, técnico y conceptual.

Uno de los capítulos que más llaman la atención es el dedicado a Grecia y a la generación del ámbito conceptual. De Lorenzo muestra su sabiduría filosófica y su conocimiento científico en un relato más que sugerente. Los griegos se habían encontrado con la dificultad de tener que asimilar los datos de la sensación y de la percepción de lo individual, con la necesidad racional de tener que dotarlos de universalidad. La *physis* es un cosmos, mantiene un orden, tiene una estructura. La matemática entra, pues, con pleno derecho en las primeras preocupaciones filosóficas. Historia, filosofía y ciencia se dan cita en este capítulo, que muestra hasta qué punto en Grecia están ya todas las preocupaciones filosóficas de la posteridad: la virtud, el poder, la política, la belleza, el lenguaje, el conocimiento... y desde ahí todo un conjunto de artefactos simbólicos. Física, astronomía, geometría, matemática, medicina y todo un cúmulo de ciencias que imponen un legado «que va a perdurar para siempre en el mundo occidental: la búsqueda de unos primeros principios que permitan engendrar el todo», en palabras del autor.

Dentro de esta breve historia, De Lorenzo dedica más de 20 páginas a explicar la transición de Grecia a Copérnico. El genio del siglo XV no escribe en el vacío, sino que es consciente de toda una tradición de investigación, traducción, generación y producción del saber en las universidades, la cual el autor de esta monografía se encarga de perfilar. Son ingentes los estudios sobre historia y filosofía de la ciencia de este fértil período. A ellos, el texto de Javier de Lorenzo les ofrece la novedad de entenderlos bajo el prisma del hacer científico.

La historia de Copérnico, Tycho Brahe, Kepler y otros está salpicada de avances y retrocesos, de observación y de prejuicios, de cuestiones científicas discutidas por planteamientos teológicos. Hasta llegar a la gran Revolución científica del siglo XVII, por la que «todo es materia en movimiento», como titula el capítulo 5. Espacio ideal y razón matemática son ahora dos artefactos básicos para el conocimiento de la *physis*. Como De Lorenzo solía hacer en sus clases, los experimentos, los datos, la historia y la intrahistoria de la ciencia le sirven para forjar un discurso en el que la erudición y el poso de saber están al servicio de una idea nuclear básica: todo en ciencia es un *hacer*.

Que esto no es solo historia de la ciencia resulta evidente. Por eso, el texto va fundamentando algunos de los conceptos clave del período más fértil de la filosofía: la Modernidad. El problema del conocimiento, de la realidad, de la autonomía, del humanismo y otras tantas cuestiones típicas de este período tienen su explicación en los avances y descubrimientos científicos. No solo en el qué, sino en el cómo. Toda la realidad queda disuelta en el concepto de representación. El conocimiento es producción de ideas que terminan siendo, en palabras de Descartes, «como imágenes de las cosas».

Física, astronomía, geometría, matemática, medicina y todo un cúmulo de ciencias imponen un legado que va a perdurar para siempre en el mundo occidental

Esta concepción representativa, que es la manera en que se explicita la carga subjetiva del conocer, se manifiesta en la construcción de modos de medir, de contar, en la producción de artefactos con los que el ser humano se hace con la realidad. Un conocimiento científico que abre el paradigma mecanicista, en el que encuentran su explicación la teoría de la gravitación universal, la geometría analítica, el cálculo diferencial e integral, etcétera. Un mecanicismo que, según De Lorenzo, no es sino una construcción simbólico-experimental «enfrentada con el sentido común». Y es que, desde entonces, «la ciencia se centra en estudiar lo que no se ve y en abandonar lo que se ve».

Y así llegamos a la Ilustración, el momento en que la ciencia se comprende como el modo de ser racional por excelencia. El espíritu científico contagia también a los otros órdenes sociales, políticos y morales para terminar construyendo un frente ideológico y técnico. La *Enciclopedia* expresa perfectamente este doble frente. La razón deberá marcar el cambio individual y social que culminará en la Revolución francesa. La técnica se ocupará de los inventos relacionados con necesidades productivas. El trabajo de Linneo o la química de Lavoiser (con su hipótesis atómica, que termina funcionando como hipótesis existencial ontológica) son ejemplos de la especialización científica y del enorme progreso metodológico: no basta con observar la *physis*, ahora hay que preguntarle. Teniendo en cuenta, eso sí, que en la construcción de esas preguntas interviene todo el conjunto de artefactos, inventos y procedimientos que constituyen la nueva praxis científica.

El siglo XIX, siglo por excelencia de la biología, experimenta un especial auge de la energía térmica y eléctrica, con la consiguiente consolidación del capitalismo. Capital, ciencia y técnica tejen relaciones recíprocas de mutuas influencias que ponen de manifiesto la relevancia industrial de la tecnociencia como factor de progreso de las sociedades. Ni que decir tiene hasta qué punto la ciencia actual muestra este compromiso de retroalimentación entre la ciencia, para mantener el capital; y el capital, para mantener las fuertes inversiones científicas. La máquina de vapor requiere energía, pero no necesita el impulso de nadie. El mecanicismo debe completarse con otras concepciones del mundo, como por ejemplo la que pone de manifiesto la termodinámica. A la longitud, masa y tiempo se añade ahora el concepto de calor. Estamos en otro modo del hacer científico. No es preciso un relojero. La ciencia alimenta lo que la filosofía posthegeliana había acuñado: Dios ha muerto porque, en realidad, el ser humano ya no lo necesita.

Con la termodinámica aparece también el concepto de sistema y la diferen-

cia entre sistemas abiertos y cerrados. Y, desde ahí, la cuestión de la reversibilidad de los fenómenos térmicos. Todo tiene un sentido. Todo sigue un orden. Y todo tiene un final. Todo tiende a su descomposición, según dicta la entropía. La causalidad, y por tanto la determinación, la capacidad omniexplicativa y, por supuesto, la facultad predictiva ceden espacio al terreno ontológico de la indeterminación y al ámbito epistémico de la incertidumbre. Es evidente que estamos en otra praxis que, según la tesis del autor, genera otro ámbito instrumental, simbólico y conceptual.

Apabulla la facilidad con que De Lorenzo entrelaza las mejores reflexiones filosóficas, las llamadas por él «inversiones epistemológicas», con las explicaciones más sutiles, exactas y clarificadoras de propuestas como las de Planck, Boltzmann, Curie, Bohr, De Broglie, Einstein, Fermi, Maxwell o Poincaré, entre varias decenas de científicos que se dan cita en las últimas páginas del libro. No es historia de la ciencia, quiero insistir en ello. No es solo una descripción ordenada de progresos científicos. Lo que más debe destacarse es cómo este reconocido filósofo y matemático entrelaza los problemas, formula preguntas, ofrece nuevos planteamientos y hace hablar a las teorías entre ellas en un trabajo investigador que supera cualquier recopilación manualística. Una recopilación que, dicho sea de paso, hubiera sido de agradecer unos años antes para quienes fuimos sus alumnos y que no tuvimos la suerte de contar con un texto que, sin duda, debe aparecer en la bibliografía de nuestras asignaturas de grado y máster.

—José Manuel Chillón
Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Valladolid

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



EXPLORACIONS PEL PLANETA MENJAR

Pere Puigdoménech Rosell
Publicacions Universitat de València, 2020
ISBN: 978-84-9134-660-9
200 págs. (20,55 €)



SOMOS POLVO DE ESTRELLAS
CÓMO ENTENDER NUESTRO ORIGEN EN EL COSMOS

José María Maza
Crítica, 2020
ISBN: 978-84-9199-243-1
120 págs. (17,90 €)



LA GRIPE ESPAÑOLA
1918-1919

María Isabel Porras Gallo
Catarata, 2020
ISBN: 978-84-1352-080-3
160 págs. (18 €)



LA COSMOVISIÓN DE LOS GRANDES CIENTÍFICOS DEL SIGLO XX
CONVICCIONES ÉTICAS, POLÍTICAS, FILOSÓFICAS O RELIGIOSAS DE LOS PROTAGONISTAS DE LAS REVOLUCIONES CIENTÍFICAS CONTEMPORÁNEAS

Coordinado por Juan Arana
Tecnos, 2020
ISBN: 978-84-309-7907-3
528 págs. (28,50 €)





MARTE Y EL ENIGMA DE LA VIDA

Juan Ángel Vaquerizo
Catarata, 2020
ISBN: 978-84-1352-084-1
128 págs. (12 €)



TERRA INSECTA
EL MUNDO SECRETO DE LOS INSECTOS

Anne Sverdrup-Thygeson
Ariel, 2020
ISBN: 978-84-344-3310-6
216 págs. (19,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

ENERO

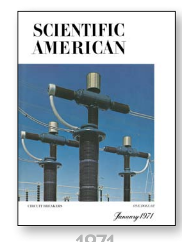
1971

El antievolucionismo evoluciona

«En meses recientes, la enseñanza del evolucionismo ha sufrido ataques en varios estados. En este resurgir, el fundamentalismo biológico presenta una forma un tanto nueva: para acentuar su oposición a las teorías actuales del origen de la vida y la diversidad de las especies se vale de los científicos y no de los teólogos. El movimiento lo encabeza la Sociedad Investigadora de la Creación, cuyos miembros han comparecido ante los consejos de educación y las comisiones de libros de texto de California, Texas, Arkansas y Tennessee. En el credo de la sociedad se afirma que la misma está "comprometida con la plena creencia en el relato bíblico de la Creación y la historia primigenia", y que su fin es realinear la ciencia basándose en conceptos teístas de la creación.»

El encanto de los púlsares

«El origen de la energía que recibe la Nebulosa del Cangrejo venía siendo un misterio que se había resistido a los intentos por explicarlo. Entre las posibilidades consideradas, Wheeler, de Princeton, en 1966, y Franco Pacini, de Cornell, en 1967, habían propuesto por separado la idea, en apariencia inverosímil, de que la fuente de energía podría ser una estrella de neutrones giratoria. Ahora, ante los hechos, es posible usar las observaciones de la Nebulosa del Cangrejo y su púlsar (NP0531) para invertir el problema y demostrar que si el púlsar es una estrella giratoria, debe tener una masa y un radio iguales a los de una estrella de neutrones. En otras palabras, aun sin la teoría desarrollada en los últimos 40 años, es posible afirmar que deben existir estrellas de aproximadamente una masa solar y radios del orden de 10 kilómetros, pues el púlsar de la Nebulosa del Cangrejo es una de tales estrellas.
—Jeremiah Ostriker»



1971



1921



1871

1921

Transporte en camión

«Esta es la era del camión. Ayer fue la del ferrocarril, antes fue la de la diligencia, y aún más atrás la de los canales. El camión, y con él nos referimos al transporte por carretera, ha madurado, ha definido su campo de aplicación y se ha establecido en él. Para el transporte a corta distancia, este vehículo es la última palabra en eficiencia. Según los expertos en camiones más destacados del país, su empleo en el transporte tanto de pasajeros como de carga es, en general, una propuesta económicamente ventajosa. Si es así, nada justifica que a los camiones se les limite por ley el uso de las carreteras.»

Un mundo conectado

«Recientemente la Compañía Telegráfica Western Union ha inaugurado al público la línea terrestre más larga de EE.UU., que comunica directamente Nueva York y Seattle. Un único cable de cobre permite enviar al mismo tiempo dos mensajes en cada dirección.»



1921: La carga y descarga de maquinaria hace del camión un eslabón productivo en el sistema de transporte.

1871

Thomas Henry Huxley

«El doctor Huxley, aunque profundo conocedor de la historia natural, también tiene tiempo para la cultura literaria en general, y disfruta con la poesía, la novela y los textos de calidad. Es esa amplia cultura lo que dota de tal fuerza a sus polémicos escritos. Nada parece gustarle más que sus regulares escaramuzas con algunos científicos de la vieja escuela, y a veces se le ha acusado de mostrar un espíritu pugnaz y cáustico. En una ocasión, Samuel Wilberforce, obispo de Oxford, le preguntó melifluamente ante numerosas personas: "¿Está de veras dispuesto el docto caballero a dejar que el mundo sepa que se cree a sí mismo descendiente de un mono?". El profesor Huxley se levantó y, con sus tranquilos modales, replicó: "Si yo debiera descender de un respetable mono, o de un obispo de la Iglesia inglesa que no hace otro uso de su cerebro que ridiculizar la ciencia y tergiversar a sus cultivadores, ¡desde luego preferiría al mono!".»

Camellos en Nevada

«En un rancho a orillas del río Carson, puede verse una manada de veintiséis camellos, todos los cuales salvo dos nacieron y se criaron en ese estado. Del camello puede ya decirse que está aclimatado a Nevada. El rancho que los guarda es en extremo arenoso y árido, pero esos animales se dan el festín y engordan con unos arbustos espinosos y unos hierbajos amargos tales que ningún otro animal tocaría. Cuando se les deja solos, su gran placer, tras hartarse de la áspera vegetación del desierto, es tumbarse y revolcarse en la arena caliente. Se emplean para llevar sal a los molinos a orillas del río, desde los marjales que hay en los desiertos, a unos cien kilómetros al este. Algunos de esos animales cargan fácilmente con 500 kilogramos.»

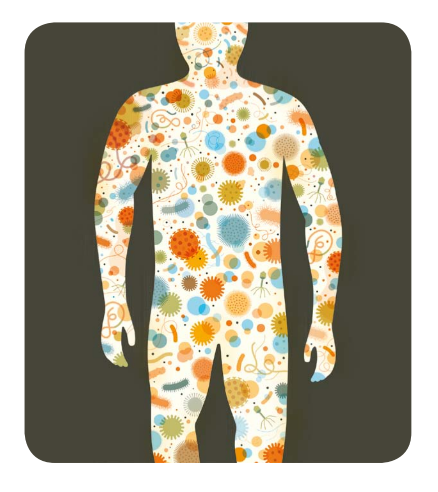
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXIV, N.º 2, 8 DE ENERO DE 1921

MEDICINA

El viroma humano

David Pride

Nuestro cuerpo alberga billones de virus. Unos son dañinos, pero otros podrían ser beneficiosos si aprendemos a servirnos de ellos.



REDES SOCIALES

La economía de la atención

Filippo Menczer y Thomas Hills

Comprender el modo en que los algoritmos y los manipuladores explotan nuestras vulnerabilidades cognitivas nos prepara para defendernos.

BIOLOGÍA

Fotosíntesis de competición

Renato Bruni

Mejorar la eficiencia de este proceso es una de las vías para aumentar el rendimiento de los cultivos en un mundo cada vez más poblado. Pero el camino hacia el éxito está lleno de obstáculos.



ASTRONOMÍA

Explosiones novedosas

Anna Y. Q. Ho

Si bien la mayor parte de las estrellas mueren de formas predecibles, los astrónomos han descubierto un creciente número de supernovas inusuales que desafían las ideas tradicionales.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes* y *Más allá del último teorema de Fermat*; Fabio Teixidó: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes, La diversificación de las aves, Al rescate del arroz* y *Microinstantáneas luminosas*; Lorenzo Gallego: *Cinco siglos de inundaciones en Europa, El trastorno de histeria en el siglo XXI* y *La pandemia que olvidamos*; Angel Garcimartín: *La espintrónica imita al cerebro*; Alfredo Marcos: *Polémica vegetal*; Ana Mozo: *Vacunas anti-COVID-19, incertidumbres y transparencia*; J. Vilardell: *Conducir sin sacudidas* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España